

**Amtliche
Baustoff- und
Betonprüfstelle F**

**Gesamthochschule
Kassel · Universität**

**Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Baustoffkunde**

**Zusammenstellung von Materialdaten
für den HRB – Basaltbeton**

Vorläufiger Abschlußbericht

Arbeitsgemeinschaft Materialforschung

Prof. Dr. – Ing. Rostásy, Prof. Dr. – Ing. Schneider

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Schneider

**Amtliche Baustoff- und Betonprüfstelle F
D - 3500 Kassel, Mönchebergstraße 7**

30-0366-001

Prof. Dr. - Ing. habil. U. Schneider
Fachgebietsleiter für Baustoffkunde
Amtliche Baustoff- und Betonprüfstelle F

G h K

**Gesamthochschule
Kassel - Universität**

Fachbereich 14
Bauingenieurwesen

**Zusammenstellung von Materialdaten
für den HRB – Basaltbeton**

Vorläufiger Abschlußbericht

Arbeitsgemeinschaft Materialforschung

Prof. Dr. - Ing. Rostásy, Prof. Dr. - Ing. Schneider

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffkunde
der Fachhochschule Kassel
Postfach 10 155
D-34109 Kassel

Vorwort

Für die geplante Sensitivitätsstudie über den Einfluß von Stoffgrößen auf das Verhalten des Spannbetonbehälters eines Hochtemperaturreaktors ist die Kenntnis von Materialdaten, ausgehend von der Raumtemperatur, über den Betriebszustand, bis hin zum hypothetischen Störfallbereich mit Temperaturen bis zum Schmelzen des Betons nötig.

Das Finite-Element-Programm **SMART**, welches hier zugrunde gelegt ist, benötigt als Eingangswerte für die Berechnung von stationären, nichtlinearen, gekoppelten Temperatur- und Feuchtefeldern sowie für Kriech- und Grenzlastberechnungen folgende Materialkennwerte :

- Thermische Kennwerte
- Hygrische Kennwerte
- Elastizitätskennwerte
- Festigkeitskennwerte
- Kriech- und Schwindfunktionen
- Thermische Zersetzungskennwerte des Betons
- Thermische Kennwerte von Spannstahl

Bei dem Beton, für den hier die Materialkennwerte ermittelt wurden, handelt es sich um einen hochfesten Basaltbeton, wie er für einen geplanten HTR Anwendung finden soll. Die in diesem Bericht dargestellten Kennwerte wurden ausschließlich auf der Grundlage vorhandener Materialdaten sowie durch Extrapolation von vorhandenen Ergebnissen, die an vergleichbaren Betonmischungen gewonnen wurden, bestimmt. Soweit es möglich und sinnvoll war, wurden bei den einzelnen Kennwerten plausible Rechenfunktionen hergeleitet und durch einfache Funktionen approximiert, wobei die Streubänder der verschiedenartigen Daten Berücksichtigung fanden. Die approximierten Kennwerte wurden dabei so festgelegt, daß sich nach unserem heutigen Kenntnisstand realistische und praxisgerechte Werte ergeben.

Die Gesamtstudie wurde von der Arbeitsgemeinschaft Materialforschung Prof. Rostasy/Prof. Schneider erstellt und gliedert sich in 2 Hauptteile. Teil 1 enthält die Bestimmung der thermischen und hygrischen Kennwerte sowie der thermischen Zersetzung des Basaltbetons, er oblag der GH Kassel; Teil 2 mit der Bestimmung aller weiteren geforderten Daten wurde von der TU Braunschweig durchgeführt. Im folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen des Teiles 1 der Studie zusammengestellt. Für den Teil 2 liegt ein gesonderter Bericht vor

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1. Einleitung	3
2. Thermische Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen	4
2.1 Wärmeleitung in Beton	4
2.1.1 Wärmeleitfähigkeit von Basalt	5
2.1.2 Wärmeleitfähigkeit von Beton	5
2.1.3 Temperaturverlauf der Wärmeleitfähigkeit	7
2.2 Mittlere spezifische Wärmekapazität	11
2.2.1 Mittlere spezifische Wärmekapazität von Betonzuschlägen	11
2.2.2 Mittlere spezifische Wärmekapazität von Beton	12
2.3 Dichte von Betonen	15
3. Wärmedehnung von Beton	17
3.1 Wärmedehnung von Basalt	17
3.2 Wärmedehnung von Basaltbeton	19
4. Thermische Zersetzungsreaktionen von Beton	24
5. Wechselwirkung von Temperatur- und Feuchtefeldern	29
5.1 Grundlagen	29
5.2 Einfluß eines erhöhten Temperaturniveaus auf den Wassergehalt von Betonbauteilen	36
5.3 Feuchteübergang an der Betonoberfläche	39
6. Zusammenfassung	42
7. Literaturverzeichnis	43
8. Anhang, Rechenfunktionen der physikalischen und hygrischen Betoneigenschaften	46

1. Einleitung

Das Rechenprogramm SMART benötigt für die thermische Spannungsanalyse eine große Anzahl von Eingabefunktionen über physikalische Materialkennwerte. Meßwerte über die physikalischen Eigenschaften von Beton wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte und Ausdehnungskoeffizient bis zum Schmelzen liegen in der Literatur vor, so daß der gesamte geforderte Temperaturbereich befriedigend genau beschrieben werden kann. Die vorliegenden Daten wurden i.a. jedoch an den verschiedensten Betonarten ermittelt, so daß bei der Untersuchung eines bestimmten Betons auf die Übertragbarkeit der vorliegenden allgemeinen Werte zu achten ist. Dieser Gesichtspunkt ist im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung von besonderer Bedeutung.

Der Feuchtetransport im Beton und seine Beschreibung durch hygrische Kennwerte, wie sie für das Rechenprogramm SMART benötigt werden, ist noch ein wesentlich schwierigeres Kapitel. Die Aufstellung einer allgemein gültigen, realitätsnahen und dennoch praktikablen Theorie des Wassertransportes in Beton ist auf der Basis der Kenntnis der Einzelphänomene und ihres Zusammenwirkens bislang kaum möglich, da eine wirklichkeitsnahe Idealisierung des Porengefüges und die mathematische Erfassung des Zusammenwirkens der vielen möglichen Speicher- und Transportmechanismen der Betonfeuchte bisher nicht gelungen ist.

Daher besteht allein die Möglichkeit der Aufstellung einer vereinfachten Theorie, welche nur von makroskopisch feststellbaren Effekten, z.B. den Wassergehalten, ausgeht, und deren typische Verteilungen und die Regeln bezüglich der Änderungen dieser Verteilungen beschreibt. Mit Hilfe dieser "makroskopischen" Theorie der Feuchtebewegung in porösen Stoffen können dann im Sinne einer Phänomenologie die interessierenden Vorgänge mathematisch nachgebildet werden [24].

Eine Beschreibung der Feuchteverlagerung im Beton wurde mehrmals mit wechselndem Erfolg versucht; die Darstellung der hier interessierenden Modelle ist dem folgenden Abschnitt 2 zu entnehmen. Zunächst wird der einfachere Fall der reinen Wärmeleitung behandelt

2. Thermische Eigenschaften von Beton bei hohen Temperaturen

Beton ist aufgrund seiner Zusammensetzung aus Zementsteinmatrix und Zuschlagsgesteinen als ein teilweise mikrokristalliner Baustoff zu charakterisieren. Daher gelten hier im wesentlichen auch die bei allen anderen kristallinen Stoffen gültigen Gesetze. Zusätzlich ergeben sich jedoch besondere Einflüsse, die vor allem durch die vorhandene Betonfeuchte und den Betonporenraum bedingt sind.

Die physikalischen Eigenschaften eines Betons hängen sowohl von seiner Zusammensetzung (Art der Zuschläge, Zementart und Wasser-/Zement-Wert) als auch von den Herstellungs-, Verarbeitungs- und Hydratationsbedingungen sowie der Nachbehandlungsart ab. Außerdem spielen die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit usw. sowie die Bauteilgeometrie eine nicht unerhebliche Rolle [5].

Insbesondere im Temperaturbereich bis etwa 300°C beeinflusst der Wassergehalt die physikalischen Eigenschaften des Betons in hohem Maße. Daneben sind auch das Porenvolumen und die Porenverteilung, die für den Porenwassergehalt bestimmend sind, von erheblichem Einfluß, so daß i.a. relativ große Streuungen bei experimentell ermittelten Kennwerten auftreten bzw. zu beobachten sind [5], wenn den Einflüssen der Betonfeuchte nicht hinreichend Rechnung getragen wird.

2.1 Wärmeleitung in Beton

Die Wärmeleitung kristalliner Baustoffe erfolgt im wesentlichen durch thermoelastische Gitterschwingungen der Moleküle. Bei steigender Temperatur nehmen die Energiedissipationen durch Unregelmäßigkeiten in den Kristallgittern erheblich zu, so daß bei Temperaturen zwischen 100°C und 1000°C die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton üblicherweise abnimmt. Hingegen nimmt bei Leichtbeton aufgrund der hier verwendeten Zuschläge, die i.a. von amorpher Struktur sind, die Wärmeleitfähigkeit mit ansteigender Temperatur zu [3]. Daraus ergibt sich, daß die Art der verwendeten Zuschläge für die Wärmeleitung eines Normalbetons von ausschlaggebender Bedeutung ist. Aufgrund des volumen- bzw. massenmäßig großen Anteils der Zuschläge an dem Gesamtvolumen ist dies nicht weiter verwunderlich. Die vorrangige Betrachtung der Zuschlagart bei der Bestimmung physikalischer Eigenschaften von Beton ist somit unabdingbar.

Unterhalb von 100°C wird die Wärmeleitung von Betonen erheblich von der vorhandenen Feuchtigkeit beeinflusst, da das in den Kapillar- und Gelporen vorhandene Wasser zum einen eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bewirkt, andererseits tritt bei nicht wassergesättigten Stoffen in Richtung des Temperaturgefälles Dampfdiffusion auf, die eine weitere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit hervorruft. Die Dampfdiffusion wird bei Temperaturen oberhalb von 60°C in ihrem Einfluß auf die Wärmeleitung so dominant, daß die maximale Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe nicht bei 100%iger Wassersättigung sondern bereits bei wesentlich niedrigeren Feuchtigkeitsgehalten auftritt [3].

2.1.1 Wärmeleitfähigkeit von Basalt

Die mengenmäßigen Anteile der den Basalt aufbauenden Minerale beeinflussen seine Wärmeleitfähigkeit erheblich. Weiterhin haben Unterschiede in den Porositätsverhältnissen und in der Textur der Gesteinsart große Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit; die durch diese Merkmale hervorgerufenen Unterschiede innerhalb einer Gesteinsart können in Extremfällen größer sein als die zwischen den einzelnen Gesteinsarten auftretenden Unterschiede [1].

Stoffe kristalliner Zusammensetzung wie der Basalt zeigen bei niedrigen Temperaturen deutlich höhere Wärmeleitfähigkeiten als Stoffe mit glasartigen (amorphen) Strukturen. Bei höheren Temperaturen sinkt die Wärmeleitfähigkeit kristalliner Mineralien (λ ist proportional $1/T$), während sie bei amorphen Stoffen ansteigt (λ ist proportional T).

Basalt zeigt deshalb aufgrund seiner überwiegend kristallinen Zusammensetzung bei Temperaturen bis zu 400°C sinkende Wärmeleitfähigkeiten; oberhalb dieses Temperaturbereiches fällt die Wärmeleitfähigkeit zwar weiterhin ab, jedoch ist im Vergleich zu anderen Betonzuschlaggesteinen dieser Abfall deutlich geringer, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, daß oberhalb von 400°C die Glasphasen des Basalts einen wachsenden Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit des gesamten Gesteins erlangen [1].

2.1.2 Wärmeleitfähigkeit von Beton

Beton ist ein inhomogener Werkstoff, dessen Wärmeleitfähigkeit von den Leitfähigkeiten der Einzelkomponenten abhängt. Im einzelnen sind folgende Faktoren von entscheidendem Einfluß :

Feuchtegehalt
Betonzuschlag
Mischungsaufbau
Zementart

Weiterhin ist bei einer Ermittlung der physikalischen Kennwerte die Temperaturbelastungsgeschichte eines Betons von Bedeutung. So ist z.B. die Wärmeleitfähigkeit im wiedererkalteten Zustand nach einer vorangegangenen Erwärmung i.a. geringer als bei einem vergleichbaren, vorher noch nicht erwärmten Beton. Die im erwärmten Zustand ermittelte Wärmeleitfähigkeit ist durchweg etwas höher als die im abgekühlten Zustand [6].

Die experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Betons ist nicht unproblematisch, weil die jeweils angewandte Versuchsmethode und die anschließende Interpretation der erzielten Versuchsergebnisse die Höhe der Meßwerte maßgeblich beeinflussen. Bei einer Erwärmung des Betons liegen nämlich infolge des Feuchtigkeitsgehaltes praktisch immer gekoppelte Transportphänomene vor, d.h. es tritt praktisch bei jeder Messung gleichzeitig ein Wärme- und Stofftransport auf, so daß die experimentellen Werte nur zu "scheinbaren" Leitfähigkeiten führen. Die einzelnen Reaktionen bzw. Transportanteile können meßtechnisch kaum voneinander getrennt werden, so daß die Werte nicht allein von der Temperatur, sondern u.U. auch von dem Weg, auf dem diese Temperatur erreicht wurde, abhängen. Bei diesen Vorgängen spielen die Dehydrier- und Dehydratationsreaktionen im Beton eine maßgebende Rolle.

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton ist bei 20°C dem Feuchtegehalt etwa proportional. Bei einer Erwärmung wird die Leitfähigkeit infolge der Abgabe von Feuchtigkeit geringer und zwar um so mehr, je höher die ursprüngliche Leitfähigkeit war. Dieser Tendenz wirkt allerdings bei Temperaturen unter 100°C die Dampfdiffusion entgegen, so daß aufgrund ihres großen Einflusses teilweise steigende Wärmeleitfähigkeiten gemessen wurden.

Der Betonzuschlag nimmt einen großen Anteil des gesamten Betonvolumens ein, so daß sein Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von herausragender Bedeutung ist, d.h. bei steigender Leitfähigkeit des Zuschlags steigt auch die Leitfähigkeit des Betons und umgekehrt.

Das Mischungsverhältnis von Wasser, Zement und Zuschlag beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit des Betons insoweit, als der Zementstein grundsätzlich eine geringere Leitfähigkeit als der Betonzuschlag aufweist und somit magere Normalbetone höhere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen als Betone mit hohem Zementanteil. Aufgrund der sehr niedrigen Leitfähigkeit von Leichtzuschlägen liegen die Verhältnisse bei Leichtbetonen genau umgekehrt.

Der Einfluß der Zementart auf die Wärmeleitfähigkeit von Beton ist nur von untergeordneter Bedeutung, da sich die Unterschiede auf die zu höheren Temperaturen hin verschobene Wasserfreisetzung bei Zementstein aus Hochofenzement gegenüber PZ-Zementstein beschränkt. Damit wird der Einfluß von Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit bei Betonen mit HOZ noch bei höheren Temperaturen spürbarer als bei Betonen mit PZ-Zementstein.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der unterschiedliche Aufbau der Betone die Hauptursache für die große Spannweite der Meßwerte der Wärmeleitfähigkeiten ist, aber auch die Versuchsmethode und die Interpretation der Meßergebnisse beeinflussen die Werte.

2.1.3 Temperaturverlauf der Wärmeleitfähigkeit

Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Feststoffskeletts und den guten Wärmeübergang zwischen den Porenwänden ist bei niedriger Temperatur und feuchtem Beton die Wärmeleitfähigkeit relativ hoch. Bei etwas höheren Temperaturen steigt die "scheinbare" Wärmeleitfähigkeit bis etwa 90°C noch etwas an, da der Temperaturgradient im Betonkörper infolge des kombinierten Wasser- und Wärmetransports geringer wird.

Die mit zunehmender Temperatur fortschreitende Entleerung der wassergefüllten Poren bewirkt etwa ab 100°C eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit, da sich die Wärmeübergangsbedingungen zwischen den Porenwänden verschlechtern. Bis zu Temperaturen von etwa 300 – 400°C führt die zunehmende Austrocknung zu weiter verschlechterten Wärmeübergangsbedingungen im Porenraum, was zusammen mit der nun abnehmenden Wärmeleitfähigkeit des Feststoffskeletts infolge Verringerung der mittleren freien Weglänge der Phononen ein weiteres Absinken der Wärmeleitfähigkeit hervorruft.

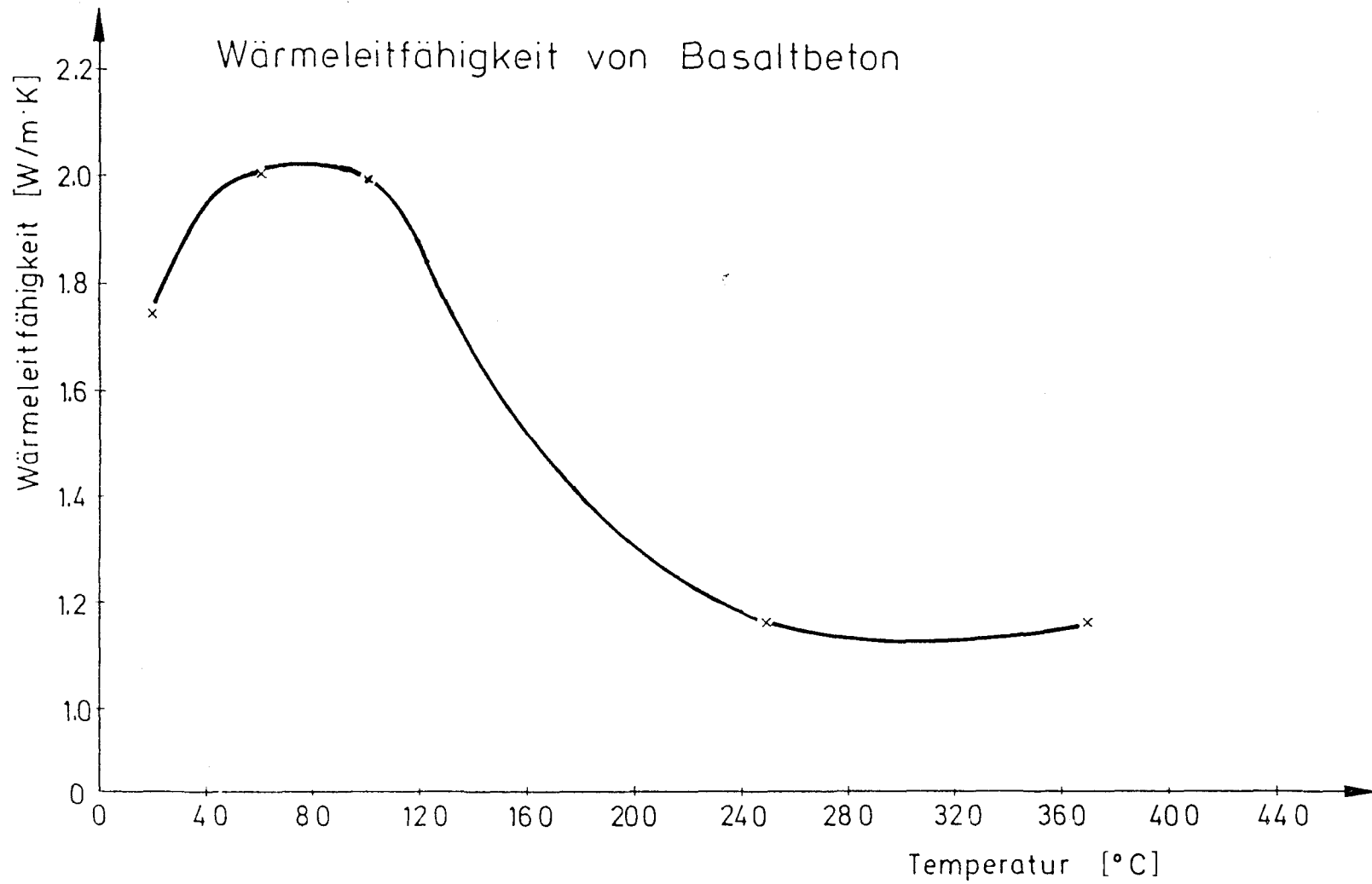
Darüberhinaus entstehen ab etwa 300°C durch thermische Inkompatibilität von Zuschlag und Zementstein verstärkte Risse, so daß wegen des dadurch weiter an Bedeutung gewinnenden Wärmeübergangs zwischen den Porenwänden die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich geringer wird.

Erst wenn ab etwa 600°C der Wärmetransport zwischen den Porenwänden vorzugsweise durch Strahlung erfolgt, ist mit einem leichten Wiederanstieg der Wärmeleitfähigkeit zu rechnen, da die Strahlung proportional mit T^4 ansteigt. Dieser Effekt wird aber meist durch einen weiteren Abfall der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffskeletts kompensiert, da die mittlere freie Weglänge der Phononen bis auf einige 10 Atomlagen in der Nähe des Schmelzpunktes absinkt.

Oberhalb von etwa 800°C bis zum Einsetzen des Schmelzens ändert sich die Wärmeleitfähigkeit des Betons nur noch in geringem Maße. Nach dem Einsetzen des Schmelzens ist nochmals mit einem allerdings nur sehr geringfügigen Abfall der Wärmeleitfähigkeit zu rechnen, so daß für viele Normalbetonarten hierfür ein Wert von etwa 1,0 – 1,2 [W/m·K] anzunehmen ist.

Auf Bild 1 ist die Wärmeleitfähigkeit eines Basaltbetons in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Der Kurvenverlauf wurde im Rahmen einer gutachtlichen Stellungnahme [23] ermittelt und bezieht sich auf einen Basaltbeton, dessen Zusammensetzung mit der Rezeptur des HTR - Betons recht gut vergleichbar ist. Die dargestellten Werte wurden an einem über 360 Tage alten Basaltbetonbauteil mit einem Feuchtegehalt von etwa 5 Gew.-% ermittelt; bei Raumtemperatur beträgt die Wärmeleitfähigkeit 1,74 [W/m·K], sie steigt bei Erwärmung bis zu 60°C auf etwa 2,1 [W/m·K] an, um bei weiterer Erwärmung bis zu 100°C etwa konstant zu bleiben. Oberhalb 100°C zeigt sie eine stetig fallende Tendenz, bis dann bei 250°C ein Wert von 1,16 [W/m·K] erreicht wird. Oberhalb dieses Temperaturbereiches treten kaum noch Veränderungen auf.

Bild 1 : Wärmeleitfähigkeit von Basaltbeton nach /23/



Im Rahmen der erwähnten Studie wurde ein Betonblock aus dem o.g. Basaltbeton erwärmt und dabei fortlaufend die Temperaturverteilung in dem Betonkörper gemessen. Bei der Nachrechnung der Temperaturverteilungen mußte zur Erzielung der bestmöglichen Übereinstimmung der Kurvenverlauf der Wärmeleitfähigkeit, wie er auf Bild 1 dargestellt ist, etwas modifiziert werden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die für den Großversuch verwendeten Betonkörper im Gegensatz zu den bei der experimentellen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit verwendeten Betonkörper erst kurz vor dem Versuch betoniert wurden und nur drei Monate gelagert werden konnten, so daß der relativ "junge" Beton noch sehr feucht war.

Die zur Nachrechnung verwendeten Werte gehen von einer Wärmeleitfähigkeit des Basaltbetons von etwa $2,1 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ aus, die im Temperaturbereich von $20 - 100^\circ\text{C}$ Gültigkeit besitzt. Oberhalb von 100°C fällt die Leitfähigkeit bis zu 250°C konstant ab, um hier einen Wert von $1,16 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ zu erreichen. Bei höheren Temperaturen ist der Verlauf beider Kurven identisch.

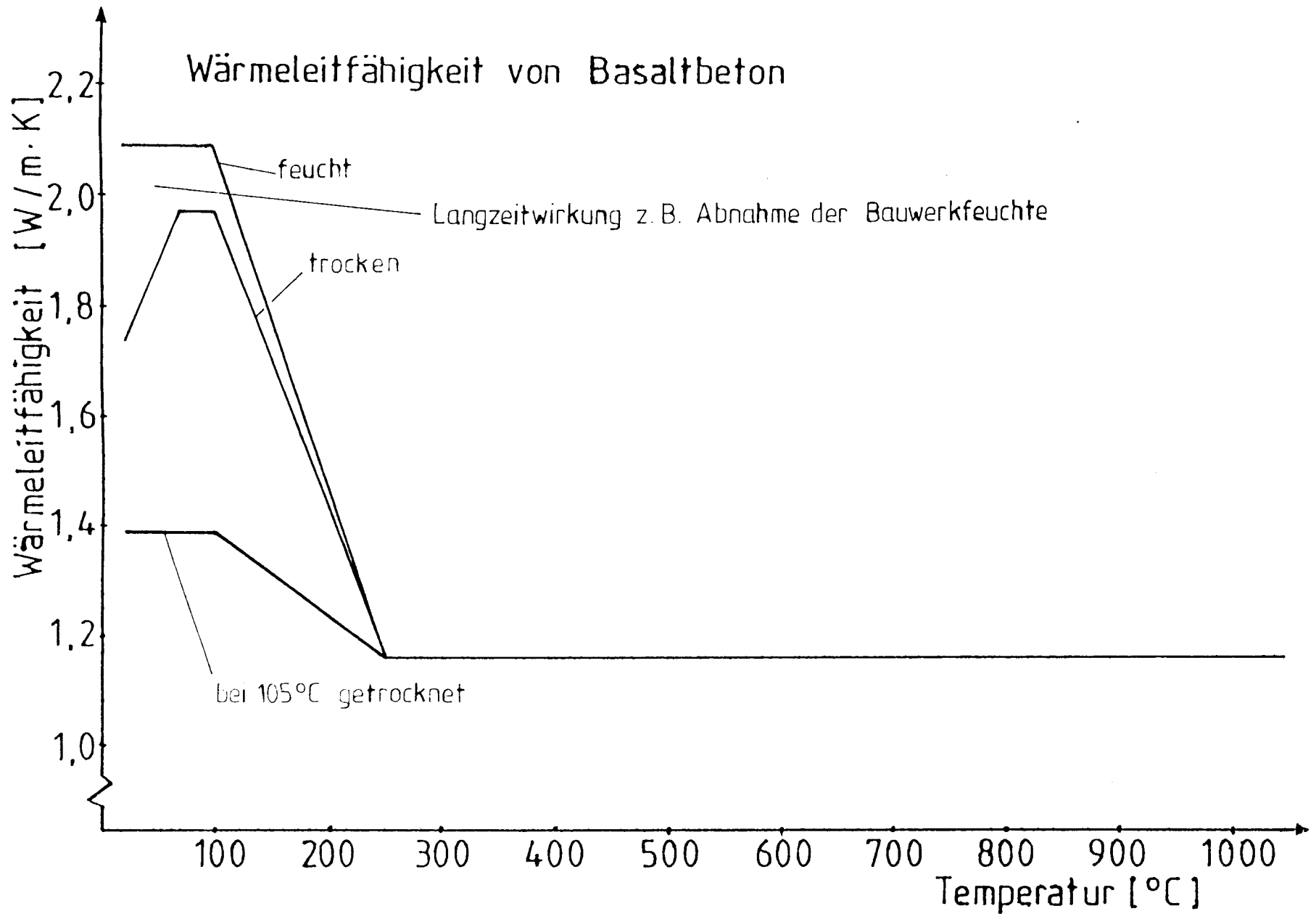
Auf Bild 2 sind beide Kurvenverläufe, also sowohl für den relativ jungen, feuchten Beton als auch für den lange gelagerten und damit vergleichsweise trockenen Beton dargestellt. Zwischen den beiden Kurven sind die in der Praxis vorkommenden Werte anzusiedeln. Im Sinne der Aufgabenstellung wurde daraus eine praxisbezogene Wärmeleitungsfunktion ermittelt.

Die den Kurvenverlauf approximierenden Funktionen lassen sich wie folgt angeben :

Temperaturbereich $[\text{}^\circ\text{C}]$	Funktionen $[\text{W/m}\cdot\text{K}]$		
	trocken	feucht	bei 105°C getrocknet
20 – 60	$\lambda=2,09$	$\lambda=5,75 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,625$	$\lambda=1,39$
60 – 100	$\lambda=2,09$	$\lambda=1,97$	$\lambda=1,39$
100 – 250	$\lambda=2,7-6,1 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$\lambda=2,51-5,4 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$\lambda=1,54-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot T$
> 250	$\lambda=1,16$	$\lambda=1,16$	$\lambda=1,16$

Unter der Bezeichnung "feucht" ist hier zu verstehen, daß der Wassergehalt des Betons bei etwa 5,3 Gew.-% liegt, der "trockene" Beton besitzt noch einen Anteil an verdampfbarem Wasser von annähernd 5 Gew.-%.

Bild 2 : Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit von Basaltbeton



2.2 Mittlere spezifische Wärmekapazität

Die Wärmekapazität c_p ist ein Maß für die Änderung der Enthalpie H von Stoffen in Abhängigkeit von der Temperatur T und dem dabei herrschenden Druck p :

$$c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

Treten bei der Erwärmung eines Stoffes chemische Umwandlungen ein, so wird dadurch natürlich die Enthalpie beeinflusst und eine Messung der Wärmekapazität liefert in diesem Fall ein verfälschtes Ergebnis, die sog. "scheinbare" Wärmekapazität [2]. Daher streuen die Messungen von Wärmekapazitäten bei Betonen sehr stark und es würde sich erst wieder ein einheitlicheres Bild ergeben, wenn alle wärmeverzehrenden oder -produzierenden Umwandlungsreaktionen bei der Bestimmung berücksichtigt werden könnten. Die Enthalpie ist hier sowohl eine Funktion des Umwandlungsgrades ξ der reagierenden Stoffe in die Endprodukte als auch eine Funktion der Temperatur.

Aufgrund des Zusammenhanges zwischen der Enthalpie und der Wärmekapazität ist auch c_p davon abhängig, wie groß der Umwandlungsgrad ξ ($0 \leq \xi \leq 1$) beim Auftreten chemischer Reaktionen ist. Daher ergibt sich als "scheinbare" Wärmekapazität :

$$c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_{p,\xi} + \left(\frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_{p,T} \cdot \frac{d\xi}{dT}$$

Nimmt man an, daß ξ nur von der Temperatur abhängig ist (in den meisten Fällen nicht gültig bei Phasenumwandlungen), ergibt sich :

$$c_p = \tilde{c}_p + \left(\frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_p \cdot \frac{d\xi}{dT}$$

Hier ist \tilde{c}_p als die reine Wärmekapazität definiert, während der zweite Term die latente Wärme darstellt.

2.2.1 Mittlere spezifische Wärmekapazität von Betonzuschlägen

Für Temperaturen oberhalb 300°C liegen in der Literatur kaum Ergebnisse vor, da die Versuchstechnik relativ schwierig zu beherrschen ist und außerdem die Gesteine in ihrer chemischen Zusammensetzung und dem strukturellen Aufbau verhältnismäßig variabel sind.

Bei hohen Temperaturen läßt sich die Wärmekapazität durch das Dulong-Petit'sche Gesetz abschätzen [1], welches besagt, daß die spez. Wärmekapazität eines Stoffes nicht von der chemischen Bindung, sondern nur von der Anzahl der Atome und ihrer Atomgewichte abhängt. Eine Abschätzung für die chemischen Verbindungen SiO_2 , Al_2O_3 und CaCO_3 als wesentliche Bestandteile der gesteinsbildenden Minerale [1] ergibt danach Werte der spez. Wärmekapazität um 1,25 [J/g·K]. Durch kalorimetrische Messungen wurden diese Ergebnisse bestätigt, es ergaben sich jedoch im Temperaturbereich oberhalb 550°C stärkere Abweichungen der Kurven für unterschiedliche Gesteine, die aber z.T. auf verfahrenstechnische Schwierigkeiten bei der Messung zurückgeführt werden können.

Ausgehend von dem bei Raumtemperatur gültigen Wert von etwa $0,8 \text{ [J/g}\cdot\text{K]}$ läßt sich die Zunahme der spezifischen Wärme des Basalts unterhalb von 500°C mit $0,08 \text{ [J/g}\cdot\text{K]}$ abschätzen [1]. Oberhalb dieses Temperaturbereiches flacht der Anstieg dann mit zunehmender Temperatur immer mehr ab.

2.2.2 Mittlere spezifische Wärmekapazität von Beton

Die spez. Wärmekapazität von quarzitischem Beton dürfte etwa die gleichen Werte aufweisen wie Normalglas (Tafelglas), da er wie dieses als Hauptbestandteil SiO_2 besitzt. Auch die meisten anderen Betone dürften in Abhängigkeit von der Zuschlagart infolge des mehr oder weniger hohen SiO_2 -Gehaltes etwa in diesem Bereich liegen [2].

Die spez. Wärmekapazität von Gläsern gilt als recht genau ermittelt, da sie sich aus den Anteilen der spez. Wärmen der glasbildenden Oxide mit guter Genauigkeit auch berechnen läßt. Da quarzitischer Beton in der Hauptsache aus kristallinem SiO_2 besteht, müßte er deshalb bei Raumtemperatur eine spez. Wärmekapazität besitzen, die etwas unter dem Wert von Normalglas liegt, da die Werte von amorphen Gläsern durchschnittlich etwas größer als die von Kristallen sind [5]. Basaltbetone dürften etwa vergleichbare Werte aufweisen.

Verschiedene Meßwerte von Betonen liegen geringfügig über dem für Tafelglas ermittelten Wert von $0,8 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$. Dies dürfte nach [2] vor allem zwei Gründe haben :

Durch das im Beton vorhandene Wasser, welches eine spez. Wärmekapazität von $c_p = 4,1868 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$ besitzt, wird auch der gesamte c_p -Wert merklich erhöht. Außerdem bewirken die bei hohen Temperaturen fast ausnahmslos exotherm verlaufenden Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen eine scheinbare Erhöhung der spez. Wärme. Der Einfluß dieser Reaktionen wird besonders deutlich, wenn man die spez. Wärmekapazität von kalzitischem Beton ermittelt. Je nachdem ob die Kalksteinentsäuerung berücksichtigt wird oder nicht, ergeben sich "scheinbare" Werte von $3,6 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$ bzw. von $1,65 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$.

Wenn alle Reaktionswärmen getrennt erfaßt und berücksichtigt werden könnten, dürfte die spez. Wärmekapazität von Betonen etwas über den Werten von Normalglas liegen, d.h. von Raumtemperatur ausgehend zeigt sich bis zu höchsten Temperaturen im Prinzip eine ansteigende Tendenz, um dann schließlich den endgültigen Wert der Schmelze zu erreichen.

Aus den vorhandenen Daten ist ersichtlich, daß bis zu Temperaturen von etwa 800°C die Art des Betonzuschlags keinen ausgeprägten Effekt auf die Wärmekapazität der Betone ausübt, d.h. unabhängig vom verwendeten Zuschlag zeigen alle Betone etwa gleiches Verhalten [2]. Erst oberhalb eines Bereiches um etwa 500°C steigt bei Kalksteinbeton infolge der Kalksteinentsäuerung die "scheinbare" Wärmekapazität stark an.

Das bei der Betonherstellung zugrundegelegte Mischungsverhältnis ist nur insofern von Bedeutung, als durch einen höheren Zementgehalt infolge von Dehydrationsreaktionen eine größere latente Wärme erzeugt wird und somit die spezifische Wärmekapazität ansteigt.

Im Gegensatz dazu hat der Wassergehalt im Temperaturbereich unterhalb von 200°C große Auswirkungen, wodurch beispielsweise wassergesättigte Betone bei 100°C eine doppelt so hohe "scheinbare" Wärmekapazität aufweisen als bei 105°C getrocknete Betone [2].

Auf Bild 3 ist die spez. Wärmekapazität des HRB-Basaltbetons dargestellt. Der Kurvenverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur liegt an der oberen Grenze des von verschiedenen silikatischen Betonen her bekannten Streubereiches der Wärmekapazität. Im Temperaturbereich bis zu 500°C wurden Ergebnisse berücksichtigt, die im Rahmen der bereits erwähnten gutachtlichen Stellungnahme [23] bestimmt wurden, wobei es sich hier nicht um experimentell ermittelte Werte, sondern um die im Verlauf der Nachrechnung von Versuchsergebnissen als optimal angesehenen Daten handelt. Die Verwendung dieser Ergebnisse ist aufgrund der bereits erwähnten guten Übereinstimmung der beiden Betonrezepturen möglich.

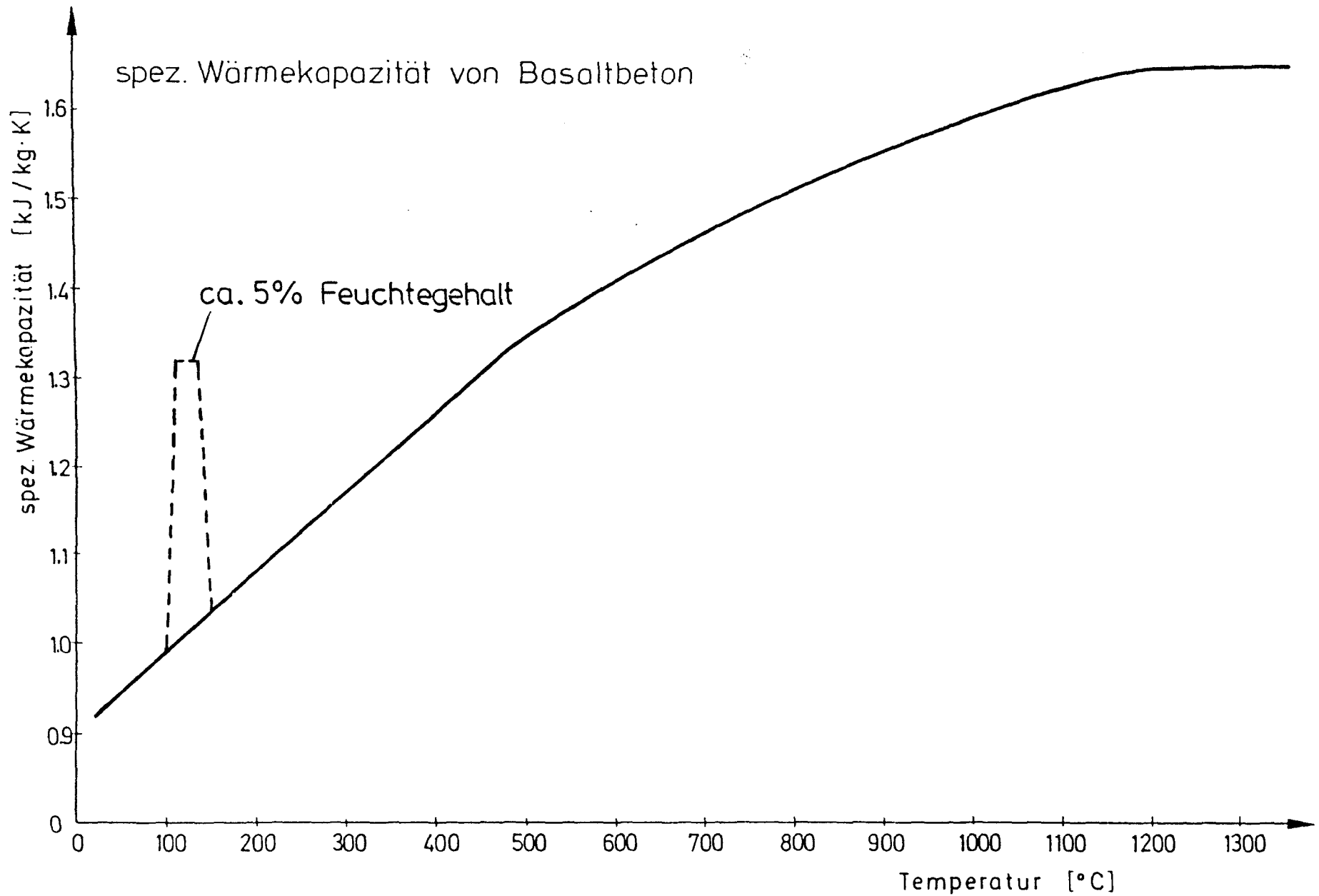
Bei Berücksichtigung der ebenfalls temperaturabhängigen Dichte des Betons ergibt sich im Temperaturbereich bis zu 500°C der auf Bild 3 dargestellte Kurvenverlauf. In dieser Kurve ist die aus der Verdampfung des Kapillarwassers bei etwa 100°C resultierende Erhöhung der Wärmekapazität des Betons infolge der latenten Wärme nicht berücksichtigt. Die auf Bild 13 im Bereich von 100 – 150°C gestrichelt dargestellte Linie gibt dagegen den Kurvenverlauf der Wärmekapazität bei Berücksichtigung der latenten Wärme an.

Die genannten Werte beziehen sich auf einen relativ feuchten Beton ; bei zunehmender Austrocknung muß mit einem leichten Rückgang der Wärmekapazität im Bereich bis zu 300°C gerechnet werden. Oberhalb von 500°C zeigt die Wärmekapazität zwar weiterhin eine steigende Tendenz, jedoch flacht die Zunahme immer mehr ab, bis schließlich bei etwa 1200°C der endgültige Wert der Schmelze von 1,6 [kJ/kg·K] erreicht wird. Der Verlauf der Kurve in diesem Bereich beruht auf Abschätzungen aus allen bekannten Daten von verschiedenen Betonen und berücksichtigt nicht die scheinbare Erhöhung der spez. Wärmekapazität infolge Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen.

Für die rechnerische Ermittlung der spez. Wärmekapazität des Basaltbetons über den gesamten Temperaturbereich werden folgende Rechenfunktionen empfohlen :

Temperaturbereich °C	Funktionen [kJ/kg·K]
20 – 500	$c_p = 8,96 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,9$
500 – 1200	$c_p = 0,35 \cdot \ln T - 0,83$
> 1200	$c_p = 1,6$

Bild 3 : Spez. Wärmekapazität von Basaltbeton nach [23]



2.3 Dichte von Betonen

Die Dichteänderung von Betonen wird im Temperaturbereich von 20 - 150°C insbesondere von der Zuschlagdichte und dem Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst. Wassergelagerte Betone zeigen gegenüber den bei 20°C und 65% r.F. klimatisierten Proben bei einer Erwärmung bis zu 150°C deutlich höhere Dichteverluste, die natürlich auf eine Wasserabgabe zurückzuführen sind. Deshalb muß darauf hingewiesen werden, daß die Lagerungsbedingungen einen besonders starken Einfluß auf die Dichteänderung von Betonen bei der Erwärmung ausüben [5].

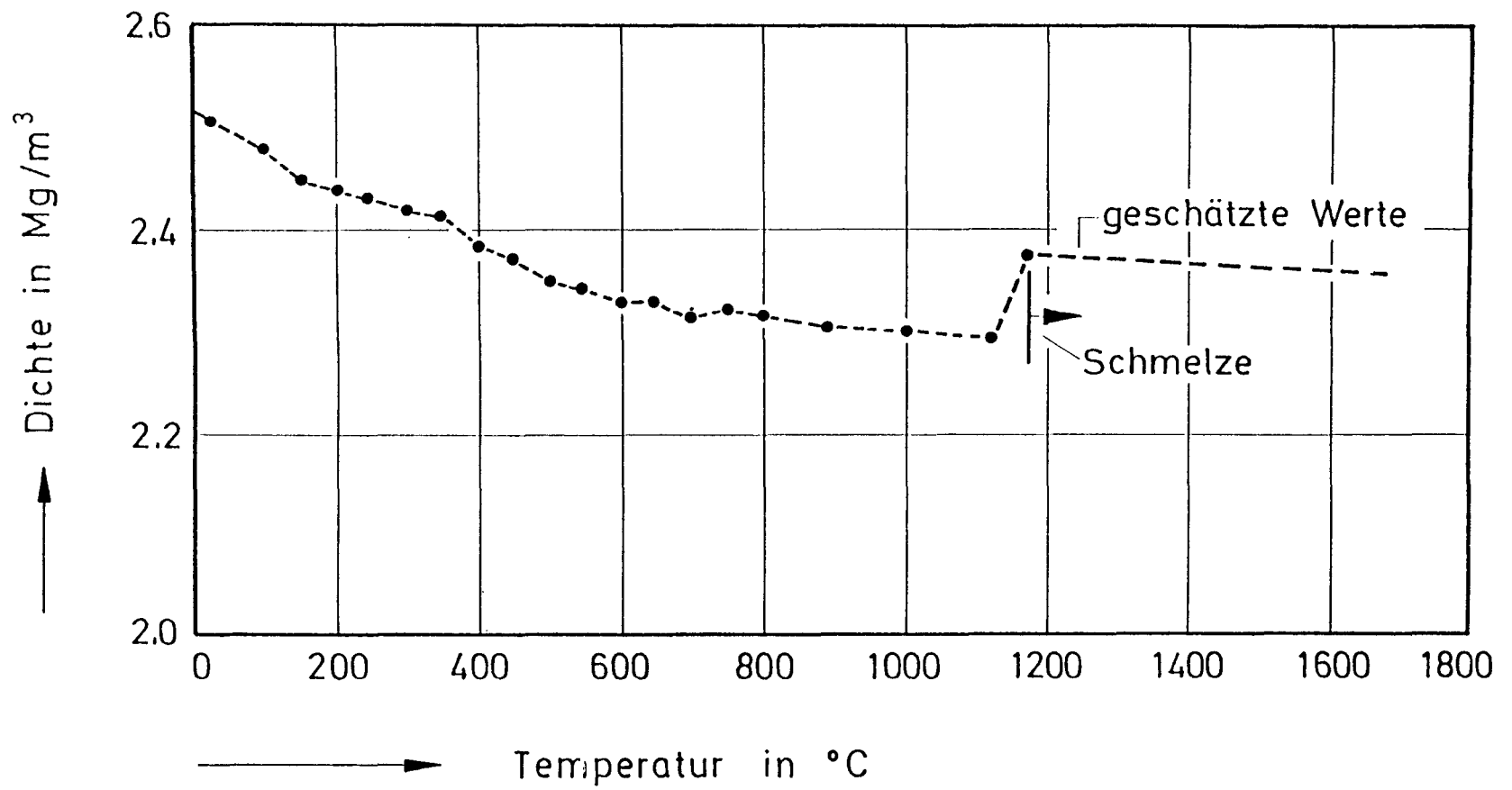
Betone mit Kalksteinzuschlägen zeigen oberhalb von 150°C bis zum Beginn der Kalksteinentsäuerung bei etwa 600°C nur einen geringen Abfall in der Dichte, da in Verbindung mit der geringen Probekörperdehnung das spez. Gewicht nahezu konstant bleibt, wohingegen silikatische Betone in diesem Temperaturbereich einen etwas höheren Dichteabfall aufweisen; hauptsächlich verantwortlich hierfür ist die höhere thermische Dehnung der Quarzite. Betone mit basaltischen Zuschlägen liegen etwas unter diesen Werten, d.h. etwa im Bereich der Kalksteinbetone, da der Basalt gegenüber den Quarziten eine vergleichsweise geringe thermische Dehnung aufweist [2].

Im Bereich zwischen 600°C und 900°C führt die Kalksteinentsäuerung bei kalzitischen Betonen zu einer hochporösen Struktur, so daß die Dichte nur noch bei Werten von 1,4 [g/cm³] liegt [2].

Bei allen Betonen führt eine weitere Erwärmung infolge steigender Ausdehnung der Probekörper bei nahezu konstantem Gewicht zu einem leichten Abfall der Dichte, oberhalb von etwa 1150°C ist jedoch durch beginnende Sinterprozesse mit einem leichten Anstieg der Dichte zu rechnen [2]. Knapp unterhalb von 1200°C beginnen die Betone zu schmelzen, wobei zunächst kleine Schmelzinseln in der Zementsteinmatrix gebildet werden; dadurch steigt die Dichte weiter an. Bei Basaltbeton ist durch den geringen Schmelzpunkt der Gesteine ab etwa 1250°C mit ansteigender Dichte zu rechnen, während dieser Einfluß bei quarzitischen Betonen infolge der höheren Schmelzpunkte (~ 1400°C) erst bei höheren Temperaturen zu erwarten ist. Letztendlich liegt die Dichte der Betonschmelze bei Temperaturen oberhalb von 1400°C bis 1500°C im Bereich von 2,2 - 2,4 [g/cm³] [5].

Die auf Bild 4 dargestellte Temperaturabhängigkeit der Dichte von Basaltbeton beruht auf Messungen, die von Schneider et al. durchgeführt wurden [6]. Danach zeigt der Basaltbeton ausgehend von Raumtemperatur mit einem Wert von 2,5 g/cm³ prinzipiell eine abfallende Tendenz; der geringste Dichtewert wird bei etwa 1150°C mit ungefähr 2,3 g/cm³ erreicht. Infolge von Sinterprozessen erhöht sich die Dichte bis zum Beginn des Schmelzens auf etwa 2,375 g/cm³. Bei weiterer Erwärmung nimmt sie dann Schätzungen zufolge voraussichtlich wieder geringfügig ab.

Bild 4 : Dichte von Basaltbeton nach [6]



Der hier beschriebene Kurvenverlauf der Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur läßt sich durch die nachstehenden Rechenfunktionen befriedigend genau approximieren.

Temperaturbereich °C	Funktionen [kg/m ³]
20 – 1120	$\rho = -49,4 \cdot \ln T + 2648$
1120 – 1180	$\rho = 1,25 \cdot T + 900$
> 1180	$\rho = -3,6 \cdot 10^{-2} \cdot T + 2418$

Eine Darstellung der mit Hilfe dieser Funktionen ermittelten Dichtewerte zeigt das Bild 10.

3. Wärmedehnung von Beton

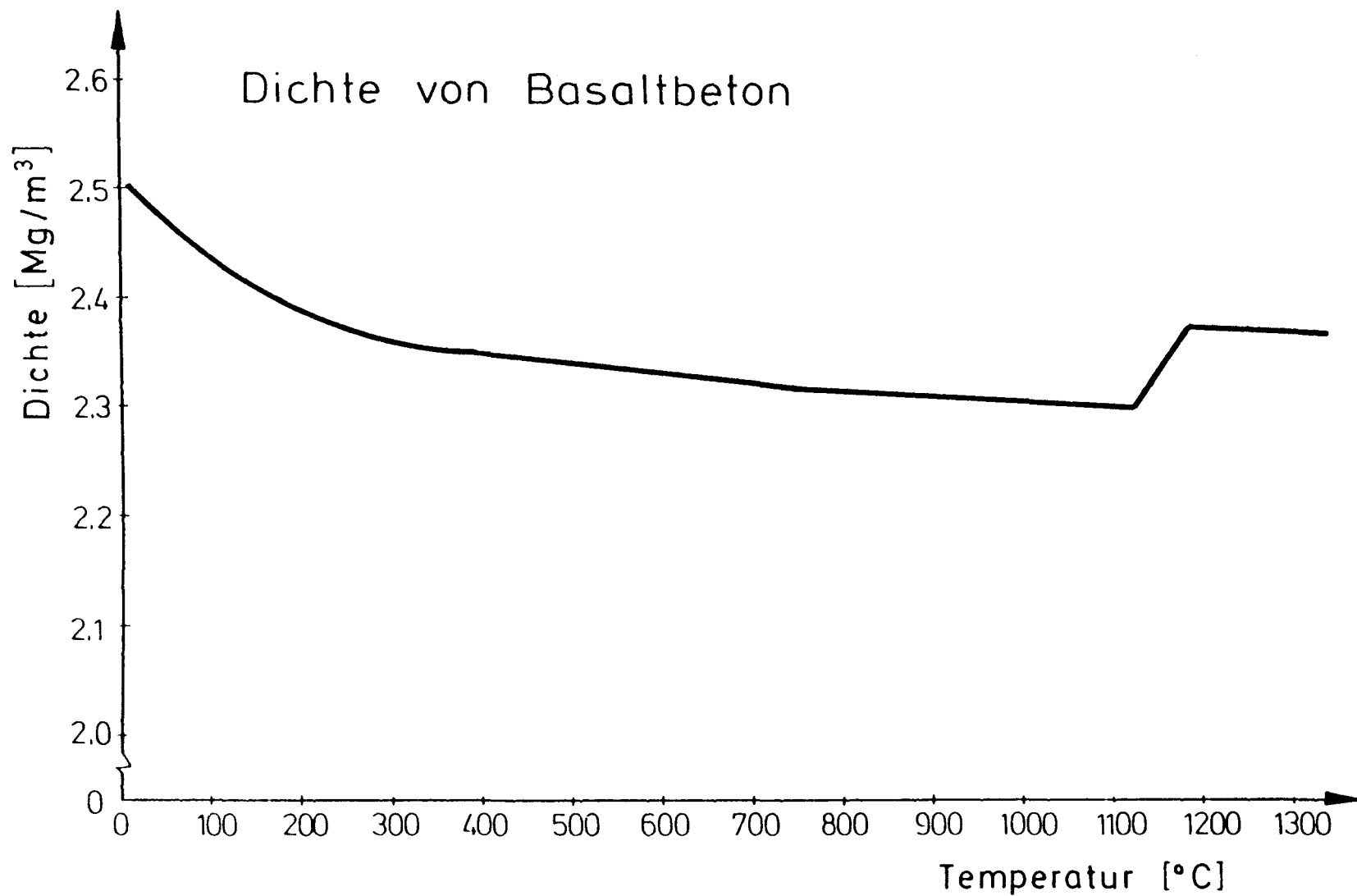
Aus verschiedenen Versuchsergebnissen läßt sich ableiten, daß die Wärmedehnung von Beton das Verhalten einer nichtlinearen Temperaturfunktion zeigt und i.a. irreversibel ist. Reiner Zementstein schrumpft bei Temperaturen oberhalb von 150°C bis zu 700°C, verschiedene Zuschlaggesteine zeigen aber bereits unterhalb dieses Bereiches erhebliche Dehnungen. Bei Temperaturen oberhalb von 700°C dehnen sich Betone meistens nicht mehr aus, einige schrumpfen sogar infolge chemischer Reaktionen. Dieses ist z.B. bei Kalksteinbeton der Fall

3.1 Wärmedehnung von Basalt

Das Dehnverhalten der Betonzuschlagstoffe, insbesondere der Grobzuschläge, ist hauptsächlich für die thermische Ausdehnung der Betone verantwortlich. Basalt zeigt im Vergleich zu anderen Zuschlaggesteinen während eines Temperaturzyklus mit Erwärmung auf Temperaturen bis zu 1000°C und anschließender Abkühlung eine nahezu lineare Ausdehnung mit dem vergleichsweise niedrigen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_T = 8 - 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [1]. Irreversible Restverformungen treten ebenfalls nur in geringem Maße auf, d.h. die inneren Gefügeschädigungen sind sehr gering. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die gesteinsbildenden Minerale des Basaltzuschlags annähernd gleiche Ausdehnungskoeffizienten besitzen und deshalb auch bei der Erhitzung auf sehr hohe Temperaturen keine nennenswerten Gefügeschäden im Korninnern, beispielsweise Risse, auftreten [1].

Im Gegensatz dazu zeigen Sandstein und andere quarzitisches Gesteine erheblich größere thermische Dehnungen. Bei den silikatischen Zuschlägen ist dafür vornehmlich der sog. Quarzsprung bei 573 °C, eine Kristallumwandlung des Quarzes, die mit einer starken Volumenzunahme verbunden ist, verantwortlich.

Bild 5 : Rechenwerte der Dichte von Basaltbeton



3.2 Wärmedehnung von Basaltbeton

Die Wärmedehnzahl α_T in $[K^{-1}]$ wird aus der Wärmedehnung berechnet und gibt an, wie groß die Änderung der thermischen Dehnung bei einer Temperaturerhöhung um 1 K ist. Bei Raumtemperatur ist die Wärmedehnzahl des reinen Zementsteins nach Lagerung bei 65% relativer Luftfeuchtigkeit etwa um den Faktor 1,5 größer als bei wassersattem Zementstein ($\alpha_T = 22,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ zu $14,8 \cdot 10^{-6}$). Der bestimmende Faktor für die Wärmedehnung der Betone ist jedoch die Zuschlagart und hier insbesondere die Fraktion der Grobzuschläge, da sie den größten Volumenanteil der Gesamtstruktur bilden. Für baupraktische Betone mit etwa 60 - 70 Vol-% Zuschlagstoffanteil ergeben sich bei Raumtemperatur für normalgelagerte Betone mit verschiedenen Zuschlagarten folgende Werte der Wärmedehnzahlen :

Quarzit :	$12 - 14 \cdot 10^{-6}$
Sandstein :	$11 - 13 \cdot 10^{-6}$
Kalkstein :	$6,5 - 8 \cdot 10^{-6}$

Die Gesamtdehnung des Betons resultiert aus der thermischen Dehnung der Einzelkomponenten, wobei natürlich Inkompatibilitäten zwischen den einzelnen Komponenten im Hinblick auf die Hochtemperatureigenschaften von Bedeutung sind. Andere Faktoren sind von geringerer Relevanz : Feuchtegehalt, Wasser-Zement-Wert und Zementart sind beispielsweise nur bei Temperaturen unterhalb 200°C von nennenswertem Einfluß.

Bei höheren Temperaturen wird die thermische Dehnung von Schwindeffekten überlagert. Das Schwinden ist jedoch im Vergleich zur Dehnung so klein bzw. wird durch Ribbildung abgebaut, so daß es in praktischen Fällen nicht gesondert betrachtet werden muß.

Die thermische Dehnung von Basaltbeton zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die von silikatischen Betonen. Da im Gegensatz zu den grobkristallinen Quarziten das Basaltgestein einen feinkristallinen Aufbau mit den Hauptbestandteilen Plagioklas, Augit und Olivin besitzt, treten jedoch geringe Abweichungen auf, d.h. bis etwa 700°C steigt die Dehnung nahezu monoton an, um dann wieder fallende Tendenz zu zeigen. Besonders bemerkenswert ist das Fehlen des Quarzsprunges und die insgesamt geringere thermische Dehnung, so daß der Basaltbeton zwischen den Werten des Kalksteinbetons und des Quarzitbetons liegt [6].

Die etwa ab 700°C auftretende Tendenz zum Schrumpfen ist zunächst auf das Schrumpfen des Zementsteins mit parallellaufender Zersetzung der CSH-Phasen zurückzuführen, oberhalb von 1100°C tragen aber auch Sinter- und Schmelzprozesse dazu bei. Da die silikatische ebenso wie die kalzitische Betonschmelze eine Dichte von $2,2 [g/cm^3]$ besitzt, wäre dann bis zum vollständigen Erschmelzen eine Material-schrumpfung zu erwarten, die von der Ausgangsdehnung bei 20°C nur sehr gering abweichen dürfte [6].

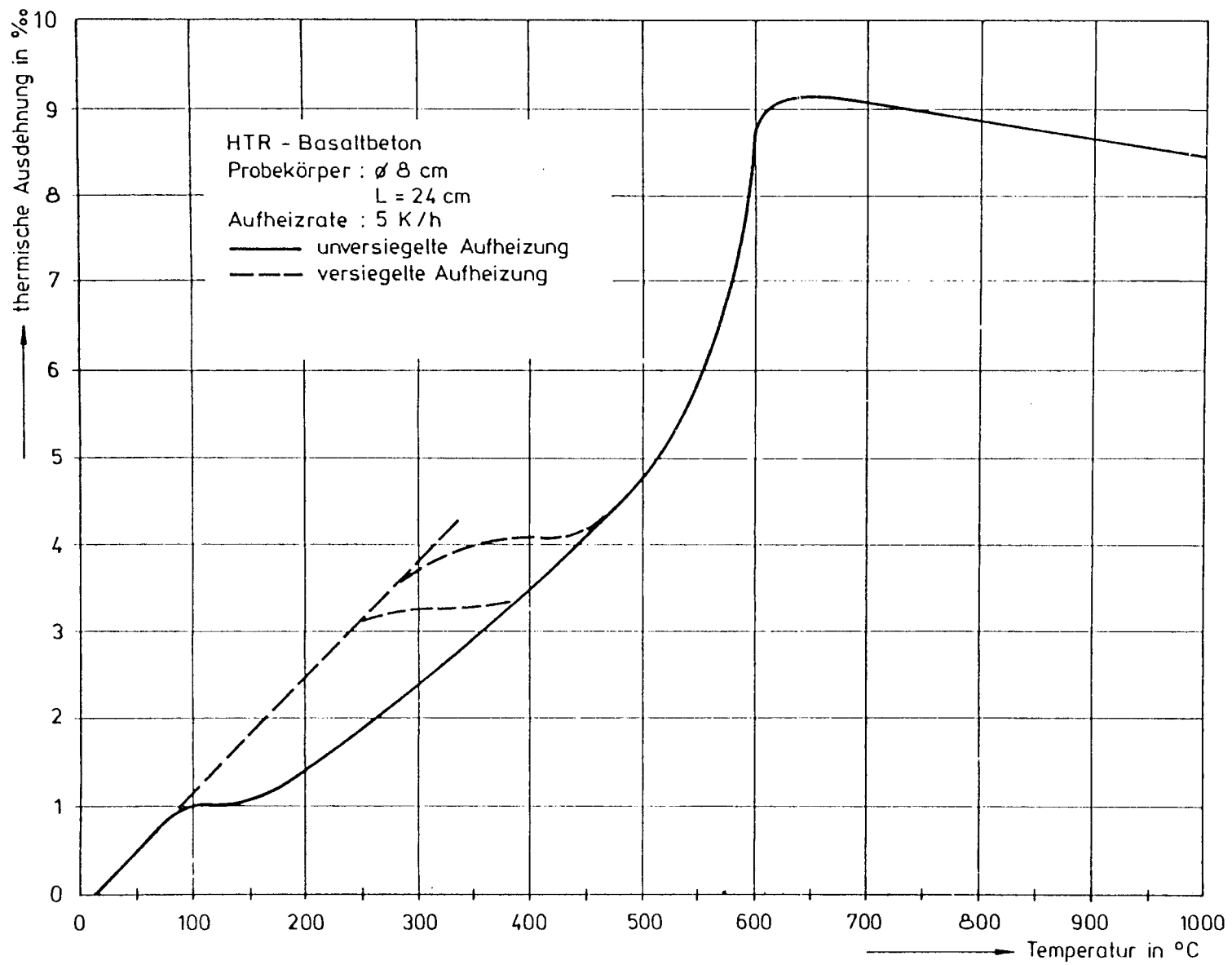
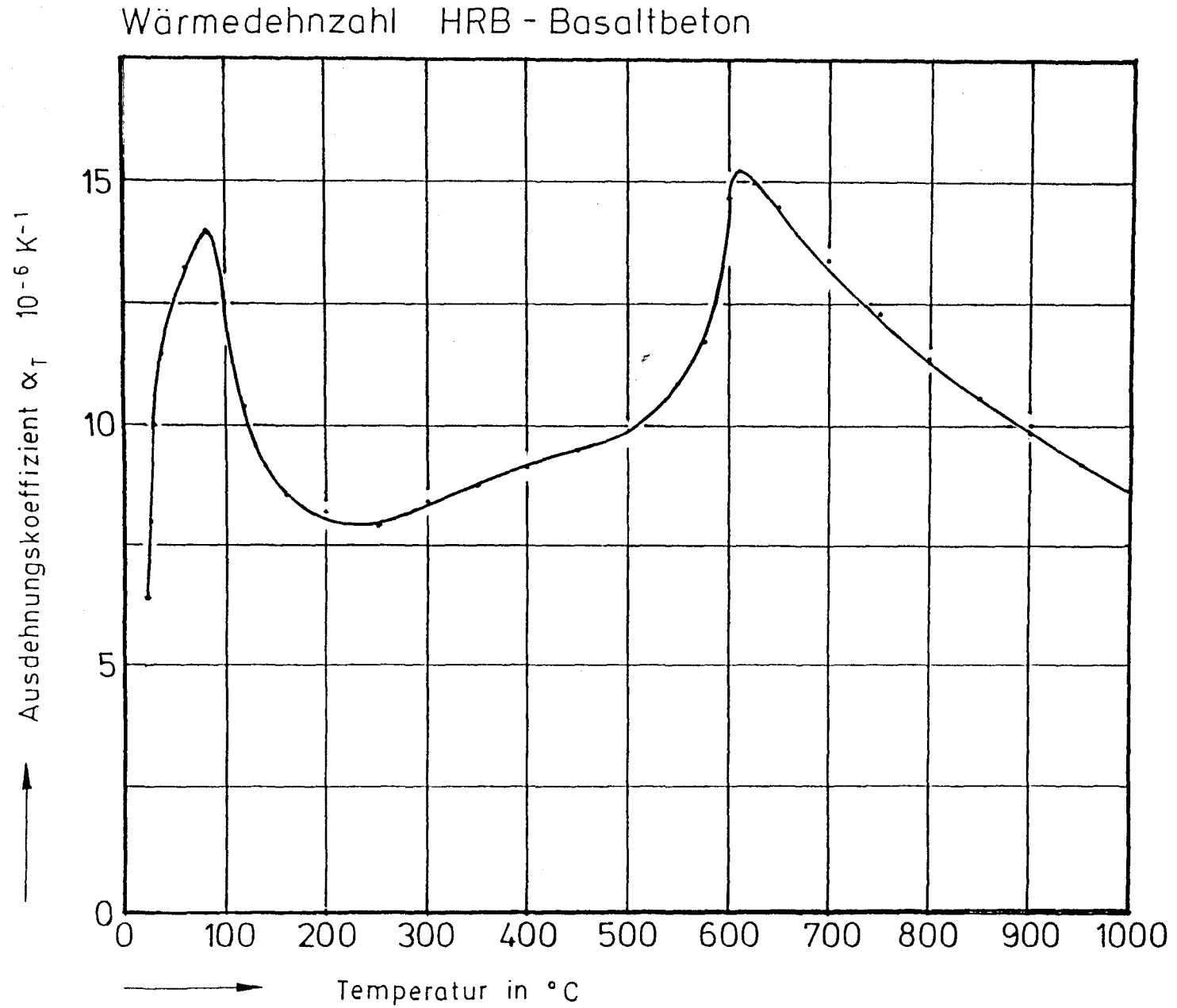


Bild 6 : Thermische Ausdehnung von versiegelt und unversiegelt aufgeteilt
 Basaltbeton nach /25/

Bild 7 : Wärmedehnzahl von Basaltbeton nach /25/



Das Bild 6 zeigt die thermische Dehnung des HTR – Basaltbetons, die experimentell an der TU Braunschweig ermittelt wurde [25] ; die aus diesen Werten errechneten Wärmedehnzahlen sind auf Bild 7 dargestellt.

Der Wassergehalt des Betons beeinflusst die Meßwerte der thermischen Dehnung insbesondere im Temperaturbereich bis zu 500°C. Je nachdem ob der Beton bei der Erwärmung Wasser abgeben kann (unversiegelte Aufheizung) oder nicht (versiegelte Aufheizung) zeigen sich in dem genannten Temperaturbereich zum Teil erhebliche Abweichungen der beiden Kurven. Die Werte für die versiegelte Aufheizung wurden im Gegensatz zu denen der unversiegelten Aufheizung nicht an dem speziellen HTR – Beton ermittelt, sondern aus Ergebnissen, die bei der Untersuchung eines vergleichbaren Basaltbetons gewonnen wurden, übertragen. Die auf Bild 6 dargestellte durchgezogene Linie entspricht dem Mittelwert aus 3 Messungen.

Bei den in einem dickwandigen HTR – Druckbehälter vorliegenden Massenbetonverhältnissen, die bei nicht zu hohen Temperaturen einer versiegelten Aufheizung nahekommen, ist im Zuge einer Erwärmung bei Dampfdrücken von 16 bar (200°C) bis 80 bar (ca. 275°C) das Auftreten einer partiellen Dampfdruckentlastung zu erwarten. Da es dabei zu einer örtlichen Austrocknung des Betons kommt, nähert sich die thermische Dehnung der des frei austrocknenden Betons an. Infolge Schwindens zeigt der Beton trotz Temperaturerhöhung während des Dampfdruckentlastungsvorgangs keine nennenswerten Ausdehnungen. Im Bild 6 sind diese Verhältnisse durch ein Abzweigen der gestrichelten Kurven bei 240°C und bei 280°C angedeutet.

Zur rechnerischen Bestimmung der Wärmedehnzahlen des HTR – Basaltbetons werden hier die folgenden Funktionen angegeben. Bei der Bestimmung der durch diese Funktionen approximierten Kurvenverläufe der Wärmedehnzahl wurde die thermische Dehnung des Basaltbetons bei unversigelter Aufheizung zugrunde gelegt.

Temperaturbereich °C	Funktionen $\cdot 10^{-6} [K^{-1}]$
20 – 80	$\alpha_T = 1,1875 \cdot 10^{-7} \cdot T + 1 \cdot 10^{-6}$
80 – 180	$\alpha_T = -4 \cdot 10^{-6} \cdot \ln T + 2,8 \cdot 10^{-5}$
180 – 500	$\alpha_T = 6,22 \cdot 10^{-9} \cdot T + 6,21 \cdot 10^{-6}$
500 – 610	$\alpha_T = 1,14 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(4,2 \cdot 10^{-3} \cdot T)$
> 610	$\alpha_T = 2 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,125$

Mit Hilfe der hier bestimmten Funktionen ergibt sich die thermische Dehnung ϵ des Basaltbetons bei einer bestimmten Temperatur T im Vergleich zur Raumtemperatur T_0 wie folgt :

$$\epsilon = \alpha_T \cdot (T - T_0)$$

Wärmedehnzahl von Basaltbeton

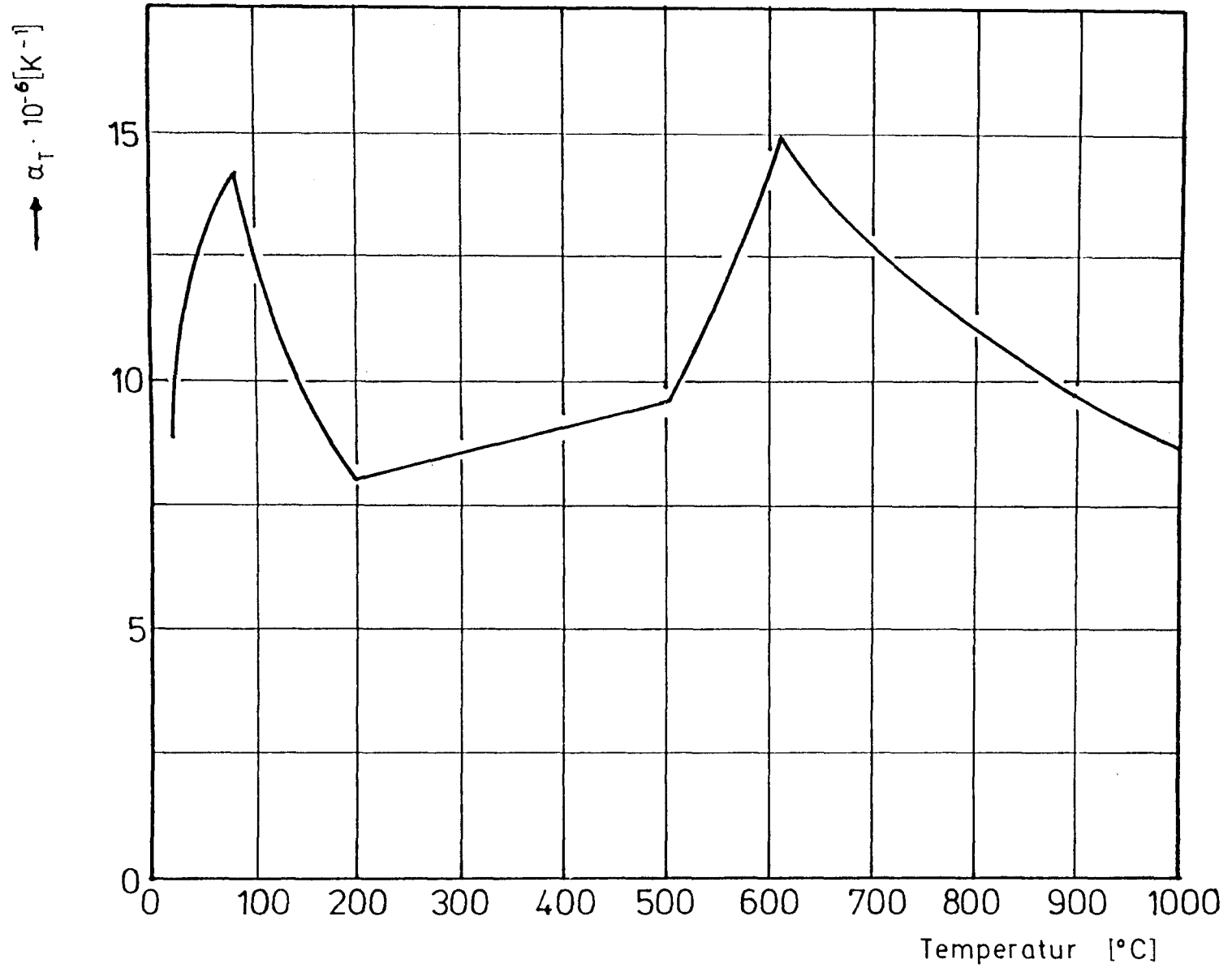


Bild 8 : Rechenwerte der Wärmedehnzahl von Basaltbeton

4. Thermische Zersetzungsreaktionen von Beton

Die während der Erwärmung des Betons einsetzenden Reaktionen lassen sich meßtechnisch mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse (DTA) nachweisen. Bei diesem Meßverfahren werden eine Inertprobe (meist Al_2O_3) und die zu untersuchende Probe gleichzeitig in einem Ofen mit 10 K/min aufgeheizt und die durch Umwandlungsreaktionen zwischen den beiden Proben auftretenden Temperaturunterschiede registriert. Ein Beispiel für ein solcherart erhaltenes Thermogramm des HTR - Basaltbetons ist auf Bild 9 dargestellt. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß nur sehr geringe Einwaagemengen (~ 250 mg) der vorher pulverisierten Probe verwendet werden können.

Aus dem DTA - Diagramm lassen sich aus den bei den verschiedenen Reaktionen auftretenden Wärmemengen im einzelnen folgende Reaktionsabläufe ableiten :

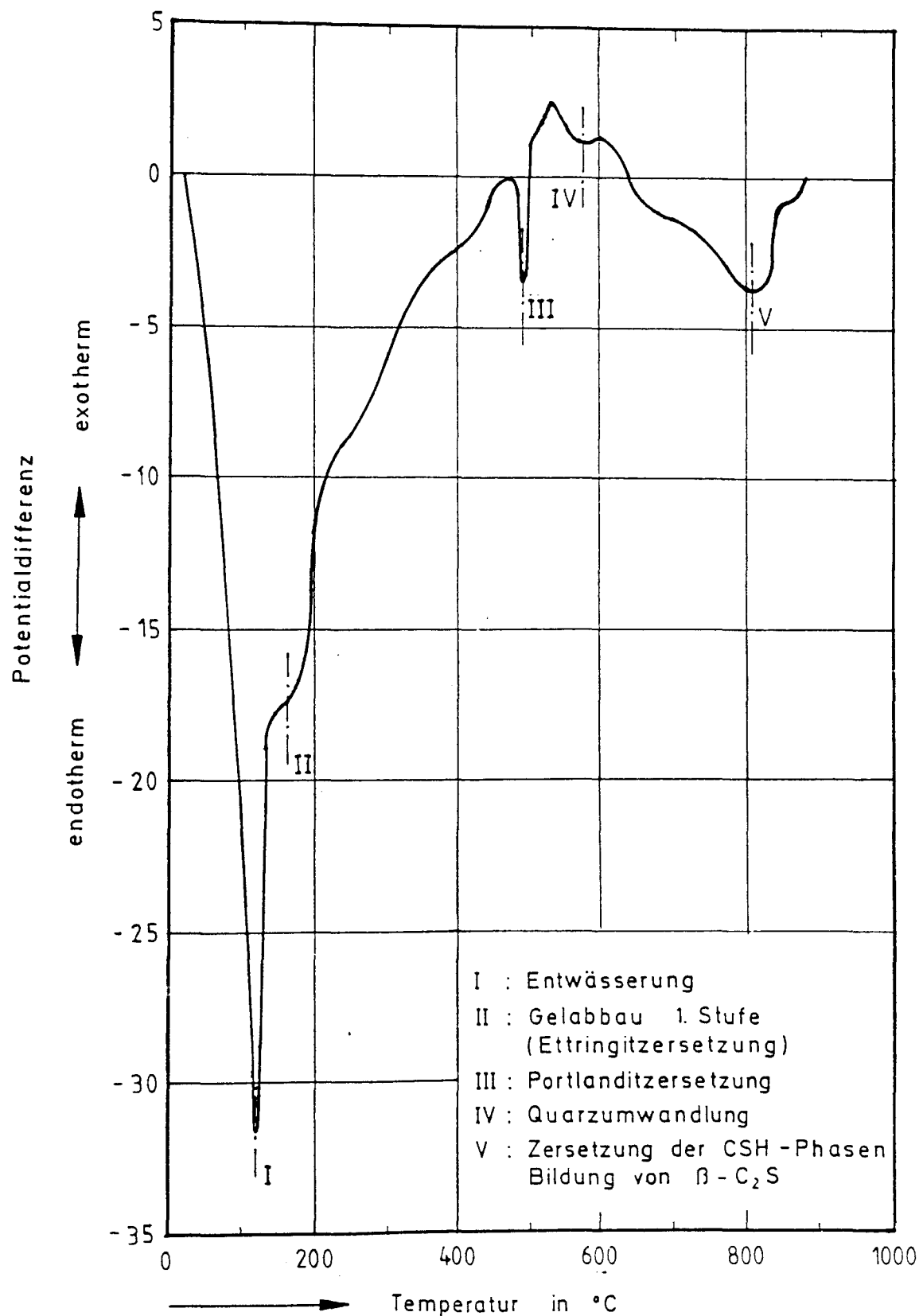
- Entwässerung bei etwa 100°C
- Gelabbau (Dehydratation 1.Stufe) bei 180°C
- Portlanditersetzung bei 500°C
- Quarzumwandlung bei 570°C (im Sandzuschlag des Basaltbetons)
- Zersetzung von Kalkstein ab 700°C (nicht bei Basaltbeton)
- Zersetzung der CSH-Phasen ab 600°C
- Beginn des Schmelzens ab etwa $1150 - 1200^\circ\text{C}$

In Abhängigkeit von der Zement- und Zuschlagart sind die einzelnen Wärmetönungen dabei unterschiedlich stark ausgeprägt bzw. gar nicht vorhanden.

Eine Betrachtung der temperaturabhängigen Abbau- und Umwandlungsreaktionen liefert nur dann qualitative Ergebnisse, wenn eine deutliche Gewichtsänderung auftritt. Aus der während der Erwärmung einer Probe bestimmten Gewichtsverlustkurve lassen sich dann folgende Einzelheiten entnehmen :

Die Verdunstung von Wasser aus den Gelporen des Betons beginnt bereits bei Temperaturen unter 100°C ; knapp oberhalb von 100°C setzt dann die Verdampfung des Grobporenwassers ein, was mit einem verstärkten Gewichtsverlust verbunden ist, der bis etwa 200°C anhält. Durch die dabei auftretenden erhöhten Dampfdrücke (> 760 Torr) wird infolge der sich einstellenden Dampfströmung das Wasser auch aus oberflächenferneren Bereichen vergleichsweise rasch ausgetrieben.

Ab etwa 120°C beginnt die Abgabe von in den kleineren Poren physikalisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser ; dieser Vorgang ist erst im Bereich von 600°C nahezu abgeschlossen. Wenn alles Wasser aus den Gelporen verdunstet ist, wird der Gewichtsverlust etwa oberhalb von 220°C etwas geringer.



Differentialthermoanalyse von Basaltbeton

Bild 9 : Differentialthermoanalyse von Basaltbeton

Im Temperaturbereich von 30 – 300°C findet parallel zur Entwässerung ein Abbau des Zementsteins statt (Dehydratation 1.Stufe). Das Maximum der Abbaurate liegt bei etwa 180°C. Ab etwa 450°C beginnt bei portlandzementgebundenen Betonen die Zersetzung des Portlandits ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$), Reaktionswärme ca. 1000 [kJ/kg], so daß der Gewichtsverlust der Proben wieder deutlich zunimmt. Bei 570°C tritt die endotherme und reversible Quarzumwandlung ein ($\alpha - \beta$ - Quarzinversion), die mit einer Umwandlungswärme von 5,9 [kJ/kg SiO_2] verknüpft ist, und von der Betone mit quarzitischem Zuschlag betroffen sind.

Neben den genannten Vorgängen tritt bei einigen Betonzuschlägen (z.B. Serpentin) im gesamten Temperaturbereich von 120°C bis 600°C die Abgabe von zeolithisch gebundenem bzw. Kristallwasser auf.

Zwischen 600°C und 700°C erfolgt ein weiterer Abbau des Zementsteins infolge Zersetzung der CSH - Phasen und daraus resultierender Bildung von $\beta - \text{C}_2\text{S}$. Diese Reaktion ist ebenso wie die Portlanditzersetzung mit einer Wasserabgabe verbunden. Nach Abschluß dieser Reaktionen ist dann theoretisch alles im Beton vorhandene Wasser aus den Poren ausgetrieben.

Etwa ab 700°C ist mit der Zersetzung des CaCO_3 zu rechnen, welche ggf. im karbonatisierten Zementstein vorzugsweise jedoch im Betonzuschlag auftritt. Im vorliegenden Fall ist dieses allerdings nicht gegeben.

Die bei HOZ - Beton mit hohem HÜS - Gehalt zu beobachtende Rekristallisation des unhydratisierten Hüttensandes läuft bei etwa 780°C ab, jedoch ist die dadurch entstehende Wärme selbst bei hohen Hüttensandgehalten nur gering. Oberhalb von etwa 900°C bis zum Einsetzen des Schmelzens zeigt sich dann bei allen Betonarten kaum noch ein nennenswerter Gewichtsverlust.

Die infolge der genannten Reaktionen auftretenden Gewichtsverluste sind in ihrer Gesamtheit sehr deutlich auf dem Bild 10 ersichtlich. Hier ist der Gesamtgewichtsverlust des HTR - Basaltbetons bei einer Aufheizung auf 900°C dargestellt, wobei die zylinderförmigen Proben einen Durchmesser von 8 cm und eine Länge von 24 cm aufwiesen; die Aufheizrate betrug 2 K/min.

Der Einfluß der Lagerungsbedingungen auf den Gewichtsverlust der Proben ist ebenfalls aus Bild 10 ersichtlich. Wie nicht anders zu erwarten liegt die Kurve für den bei 20°C/65 % r.F. gelagerten Beton stets unter der Kurve der wassergelagerten Probe, d.h. der Gewichtsverlust der wassergelagerten Probe ist stets größer als derjenige der bei Normklima gelagerten Probe. Die Gewichtsverlustkurve des bei 105°C vorgetrockneten Betons würde nochmals unter den beiden vorherigen Kurven liegen.

Alle hier erwähnten Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen sowie die dabei auftretenden Wärmetönungen sind in der Tabelle 1 noch einmal übersichtlich dargestellt. Außerdem stellt diese Tabelle auch die dabei umgesetzten Massen dar.

Bild 10 : Thermogramm von portlandzementgebundenem Basaltbeton

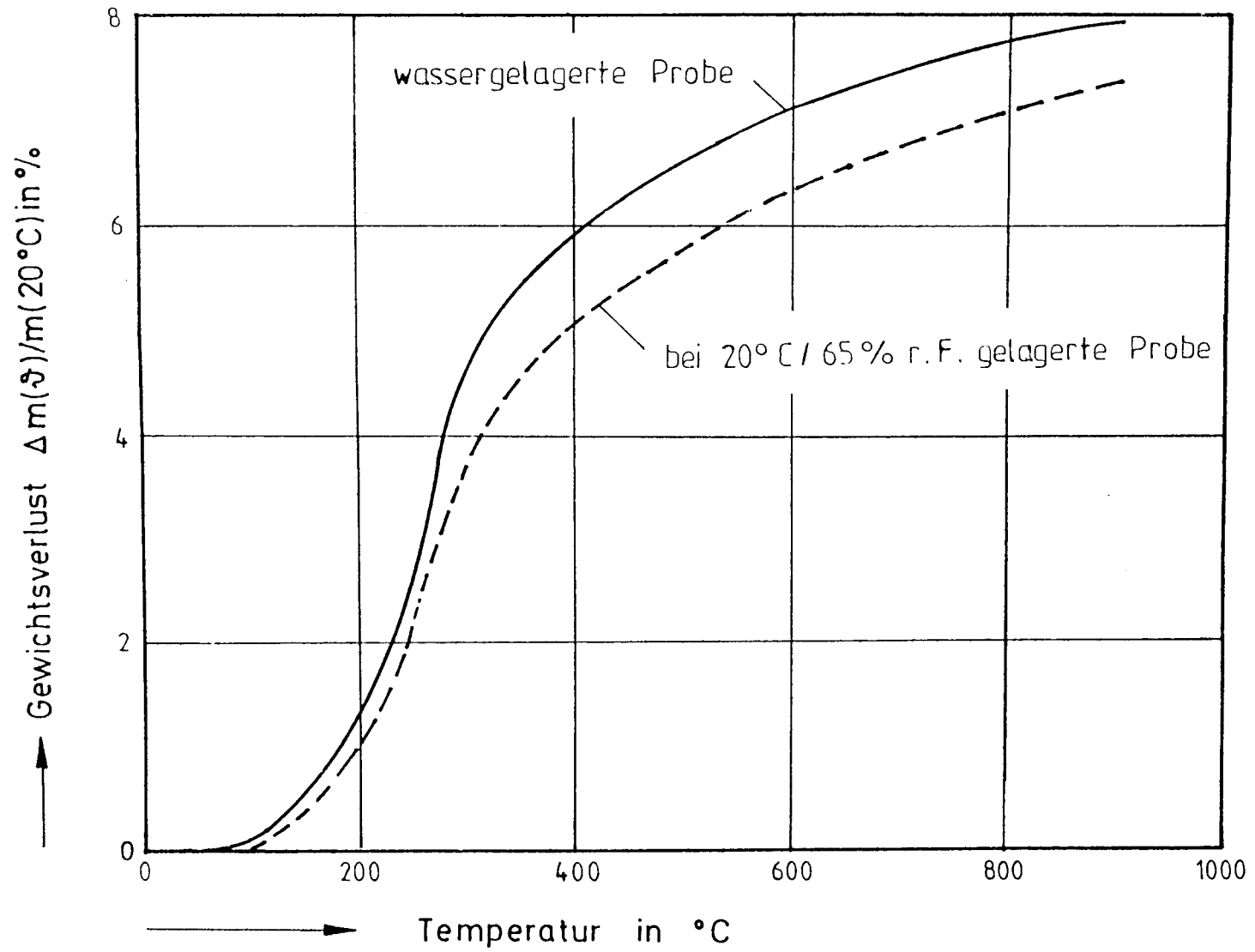


Tabelle 1 : Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem Beton (Massenbeton) auf Hochofenzementbasis

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion	Wärmetönung	Reaktions-/Umwandlungswärme [kJ/kg]	Reaktions-/Umwandlungswärme [MJ/m ³ Beton]	umgesetzte Menge
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser ca. 2258	290	ca. 130 kg Wasser
30 - 300	Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe	endotherm	Hydratationswärme ca. 250	20	< 78 kg "Zementstein"
120 - 600	Abgabe von zeolithisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser	endotherm	> 2258	135	ca. 60 kg Wasser
450 - 550	Portlandit-zersetzung $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	endotherm	ca. 1000	< 40	< 40 kg CaO
570	Quarzumwandlung $\alpha \rightarrow \beta \text{SiO}_2$	endotherm	5,86	8,8	ca. 1500 kg Quarzit
600 - 700	Zersetzung der CSH-Phasen Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$	endotherm	Hydratationswärme ca. 500	120	< 240 kg "Zementstein"
um 780	Rekristallisation der glasartig erstarrten Hochofenschlacke	exotherm	Rekristallisationswärme ca. 50	5	ca. 100 kg
ab ca. 1350	Schmelzen des Betons	endotherm	Schmelzwärme ca. 3077 (2560 ÷ 3600)	6.460	ca. 2100 kg Beton

5. Wechselwirkung von Temperatur- und Feuchtefeldern

5.1 Grundlagen

In den meisten praktischen Fällen wird das Wasser im Beton gleichzeitig im flüssigen und dampfförmigen Zustand transportiert. Der Flüssigkeitstransportanteil wird dabei im wesentlichen durch Kapillarleitung, der Dampftransportanteil im wesentlichen durch Diffusion bestimmt. Durch Überlagerung beider Anteile ist eine integrale Erfassung der auch praktisch nicht zu trennenden Transportanteile nur pauschal möglich. Die Beschreibung des gleichzeitig stattfindenden Wärme- und Stofftransportes ist mit erweiterten Potentialansätzen möglich, wobei die einzelnen Transportanteile gemäß ihrem Auftreten in den einzelnen Phasen von den verschiedenen Transportpotentialen bestimmt werden.

Der Feuchtetransport durch Diffusion erfolgt in Form ungeordneter, thermischer Eigenbewegung von Molekülen und wird durch ein Konzentrations- bzw. Partialdruckgefälle verursacht. Die sog. Thermodiffusion hingegen beschreibt die Dampfdiffusion unter der zusätzlichen Einwirkung eines Temperaturgradienten, wobei zu beachten ist, daß der Anteil der Thermodiffusion am gesamten Massenstrom eines nicht-isothermen Transportvorganges im Bereich nur mäßig erhöhter Temperatur gering ist [5].

In dem baupraktisch am häufigsten vorkommenden Luftfeuchtebereich zwischen 50 und 90 % relativer Feuchte erfolgt der Feuchtetransport größtenteils durch Diffusionsvorgänge, deren makroskopische Gesetzmäßigkeiten im eindimensionalen, isothermen Fall erstmals von Fick formuliert wurden. Analog zur Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung wird die Diffusion durch das Fick'sche Diffusionsgesetz beschrieben. Da der Feuchtestrom q_h in einem porösen Körper proportional zum Feuchtegradienten (dH/dx) der Feuchtekonzentration ist, läßt sich schreiben :

$$q_h = D \cdot \text{grad } H \quad (1)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor D als Diffusionskoeffizient bezeichnet wird. Die Feuchtekonzentration H in [%] bezieht sich hier per Definition auf den Gehalt an verdampfbarem Wasser, d.h. den gewichtsmäßigen Anteil am nicht chemisch gebundenen Wasser im Beton.

Bei der Betrachtung eines Volumenelementes mit den Kantenlängen dx , dy und dz ergibt sich die zeitliche Feuchteänderung als partielle Differentialgleichung 2. Ordnung :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \dot{H} = D \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Der Diffusionskoeffizient bzw. die Feuchteleitfähigkeit D wird hier analog zur Wärmeleitzahl λ in der Theorie der Wärmeleitung als Transportkennwert betrachtet. Im allgemeinen Fall ist diese Betrachtungsweise nicht angebracht, da der Feuchte-transport von den "treibenden Potentialen" Feuchtekonzentration, Temperatur und Gesamtdruck abhängig ist, denen jeweils entsprechende Transportkoeffizienten (hygrischer, thermischer und gesamtdruckbezogener Transportkoeffizient) zugeordnet sind bzw. werden müssen

Zu einer umfassenden Beschreibung der Feuchtetransportvorgänge ist ein kombinierter Ansatz mit Überlagerung von Diffusion und Kapillarleitung geeignet. Im eindimensionalen Fall kann dann bei stationärer Temperatur folgende nichtlineare Differentialgleichung formuliert werden :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \dot{H} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_H(H, T, p) \frac{\partial H}{\partial x} + k_t(H, T, p) \frac{\partial T}{\partial x} + k_p(H, T, p) \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (3)$$

Es bedeuten :
 k_H = hygrischer Transportkoeffizient
 k_T = thermischer Transportkoeffizient
 k_p = gesamtdruckbezogener Transportkoeffizient

Setzt man voraus, daß der Gesamtdruckeinfluß zu vernachlässigen ist (nur gültig bei Betonbauteilen im Temperaturbereich unter 100°C, wo näherungsweise atmosphärische Druckverhältnisse im Beton herrschen), so ist in einem Betonkörper der Feuchte- bzw. Konzentrationsgradient neben dem Temperaturgradienten das maßgebende Transportpotential. Die Differentialgleichung der Diffusion (3) vereinfacht sich bei Ansatz von nur feuchte- und temperaturabhängigen Transportkoeffizienten dann wie folgt :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_H(H, T) \frac{\partial H}{\partial x} + k_T(H, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (4)$$

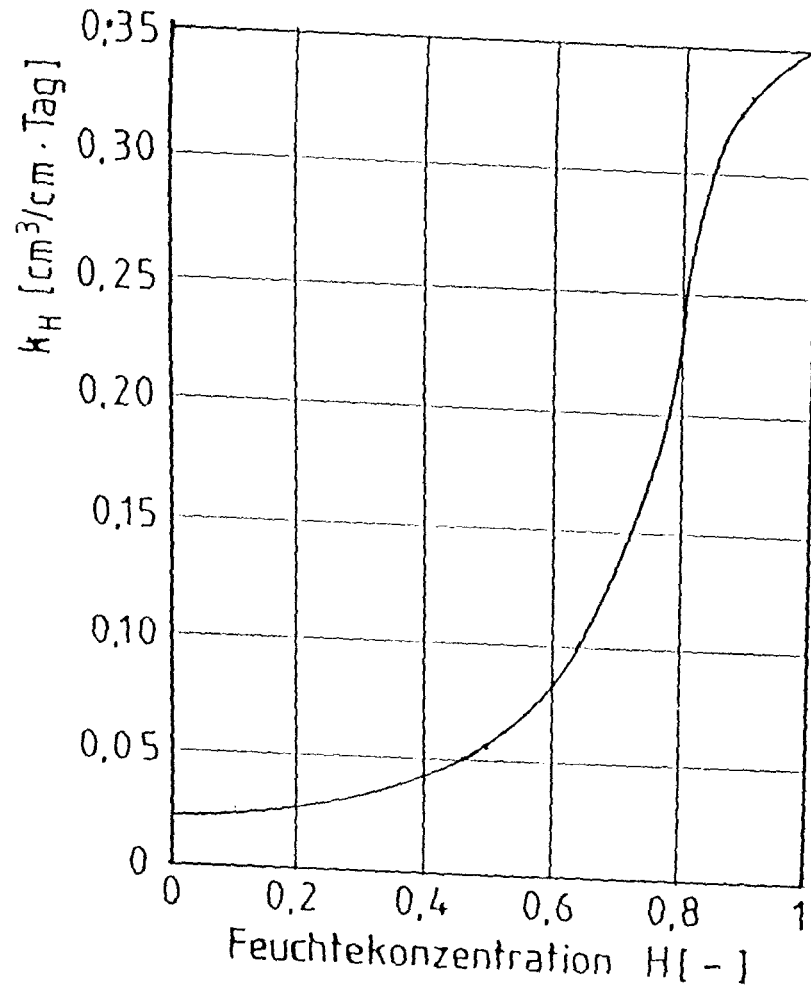
Die Bestimmung der Transportkoeffizienten k_H und k_T wurde zuerst von Pihlajavaara versucht, der durch Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit des hygrischen Transportkoeffizienten und des thermischen Transportkoeffizienten eine bessere Übereinstimmung zwischen Lösungen der Diffusionstheorie und Versuchsergebnissen erzielte. Nach seiner Modellvorstellung war die Differentialgleichung der Diffusion wie folgt zu formulieren :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_H(H) \left(\frac{\partial H}{\partial x} + s_H(H) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

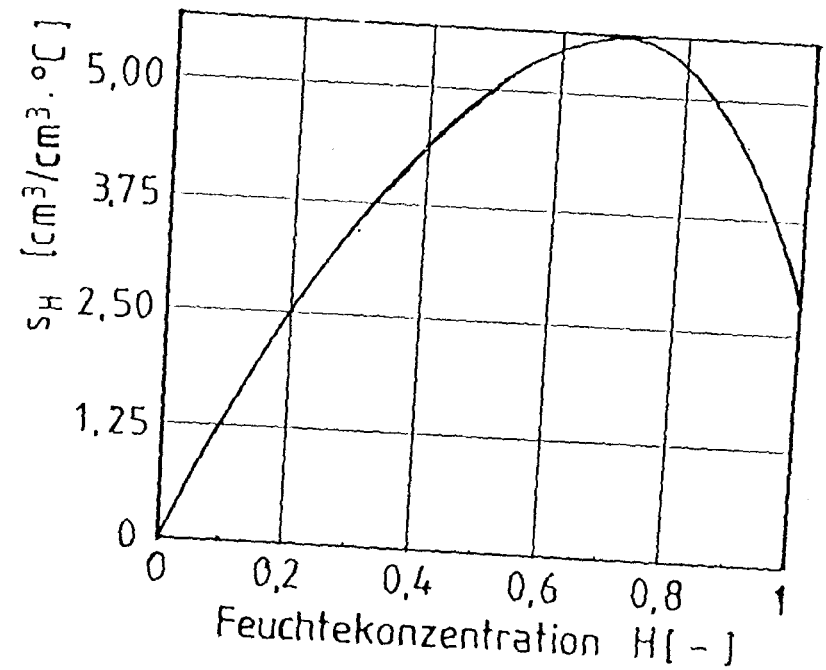
wobei die sog. thermale Feuchteleitfähigkeit s_H aus experimentell ermittelten Werten bestimmt wurde und die Berücksichtigung des Einflusses des Temperaturgradienten auf den Feuchtetransport gestattet. Die Wirkung eines gegenüber Normaltemperatur erhöhten Temperaturniveaus wird in Gl. (5) allerdings vernachlässigt.

Bild 11 : Hygrischer Feuchteleitkoeffizient k_H und thermale Feuchteleitfähigkeit s_H nach Pihlajaara / 20/

Hygrischer Feuchteleitkoeffizient k_H [$\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{Tag}$]



Thermale Feuchteleitfähigkeit s_H [$\text{cm}^3/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$]



Die Koeffizienten k_H und s_H sind nach Pihlajavaara in Abhängigkeit von der Feuchtekonzentration H (in relativen Einheiten) dann wie folgt zu bestimmen (Bild 11) :

$$k_H = 0,35 \cdot \left[0,05 + \frac{0,95}{1 + (4 - 4H)^3} \right] \quad (6)$$

$$s_H = 0,2 \cdot H \cdot \left(\frac{1,1 - H}{1,7 - H} \right) \quad (7)$$

Erst Bazant formulierte die Differentialgleichung der Diffusion unter Berücksichtigung der Wirkung eines erhöhten Temperaturniveaus, vernachlässigte aber gleichzeitig den Einfluß des Temperaturgradienten als treibendes Potential, so daß sich ergibt :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_H(H,T) \frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad (8)$$

Die Abhängigkeit des hygrischen Transportkoeffizienten von der Feuchtekonzentration und dem Temperaturniveau wird durch einen Separationsansatz mittels zweier experimentell gefundener Funktionen berücksichtigt ; k_H wird dann durch die beiden separaten, miteinander zu multiplizierenden Funktionen $f_1(T)$ und $g_1(H)$ dargestellt. Für Normalbetone haben die von Bazant nach Auswertung von Versuchen gefundene empirische Funktion $g_1(H)$ und die einem Arrhenius - Ansatz entsprechende Funktion $f_1(T)$ folgendes Aussehen (Bild 12) :

$$f_1(T) = \frac{T}{T_0} \cdot \exp \left[4683 \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (9)$$

$$g_1(H) = 0,25 \cdot \left(0,05 + \frac{0,95}{1 + (4 - 4H)^{16}} \right) \quad (10)$$

Hierin bedeuten :

T_0 = Bezugstemperatur [K] = 293 K $\hat{=}$ 20°C

T = absolute Temperatur [K]

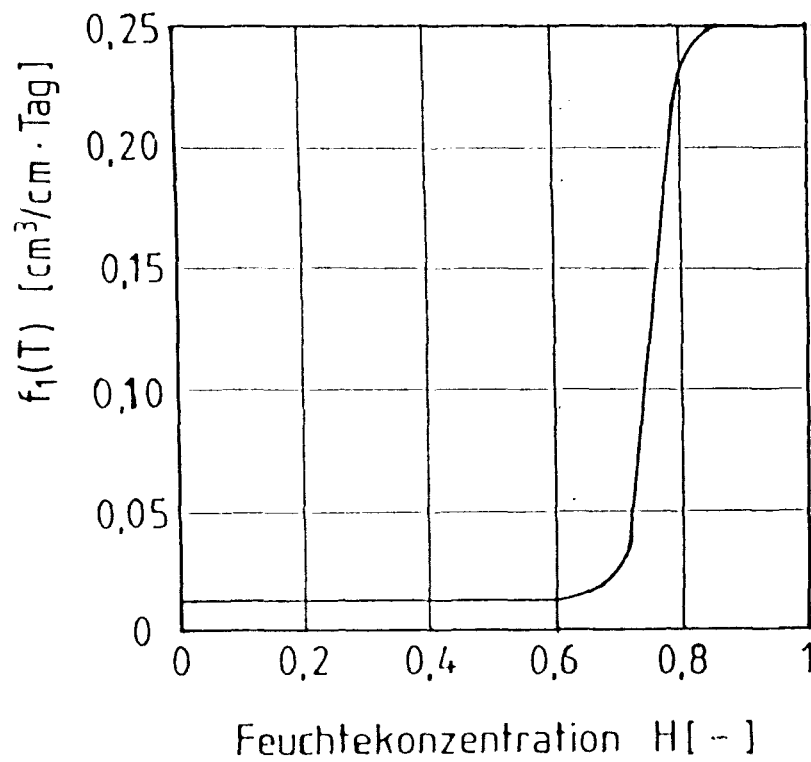
4683 = Aktivierungsenergie der Diffusion/Gaskonstante [K]
(mittlerer Wert aus Versuchsergebnissen von Bazant)

$g_1(H)$ ergibt sich in [cm²/Tag], $f_1(T)$ ist dimensionslos.

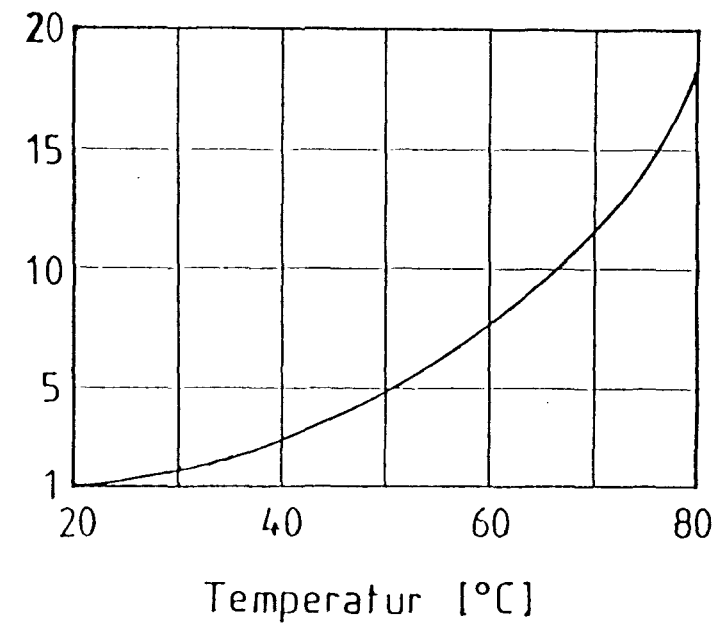
Die bisher genannten Modelle wurden von Kiehl erweitert [9], der unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Pihlajavaara und Bazant sowohl den hygrischen als auch den thermischen Transportkoeffizienten in Abhängigkeit von der Feuchtekonzentration und der Temperatur formulierte, so daß zum ersten Mal der Ansatz nach (4) voll verwirklicht wird. In Anlehnung an die Arbeit von Bazant wurde für den thermischen Transportkoeffizienten auch hier ein Separationsansatz zweier Funktionen gewählt, da es sich bei der Feuchtebewegung aufgrund von Temperaturgradienten ja ebenfalls um einen konzentrationsabhängigen und thermisch aktivierbaren Vorgang handeln muß :

Hygrischer Feuchteleitkoeffizient k_H [$\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{Tag}$]

Hygrische Feuchteleitfähigkeit $g_1(H)$



Temperaturfaktor $f_1(T)$ [-]



$$k_T = f_2(T) \cdot g_2(H) \quad (11)$$

Die Ermittlung der Teilfunktionen $g_2(H)$ und $f_2(T)$ erfolgte mit Hilfe eines Rechenprogrammes, indem die Funktionen solange variiert wurden, bis gemessene Feuchteverteilungen in massigen Betonbauteilen befriedigend approximiert werden konnten. Nach [9] ergibt sich :

$$f_2(T) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^6 \cdot \exp \left[\frac{5,34 \cdot 10^{13}}{T^4} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} g_2(H) &= 5,36 \cdot 10^{-3} \cdot H + 2,4 \cdot 10^{-7} & [0 \leq H < 0,56] \\ &= 3,91 \cdot 10^{-2} \cdot H^3 - 6,58 \cdot 10^{-2} \cdot H^2 & \\ &\quad + 3,16 \cdot 10^{-2} \cdot H - 9,26 \cdot 10^{-4} & [0,56 \leq H < 0,8] \\ &= -1,128 \cdot 10^{-2} \cdot H + 1,1304 \cdot 10^{-2} & [H \geq 0,8] \end{aligned} \quad (13)$$

$f_2(T)$ ist hier ebenfalls dimensionslos, $g_2(H)$ ergibt sich in $[\text{cm}^2/\text{Tag} \cdot \text{K}]$

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß die Funktion $g_2(H)$ von Kiebl nicht explizit ausgewiesen wurde, so daß der hier angegebene Kurvenverlauf von $g_2(H)$ eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Näherungslösung darstellt, womit die in [9] dargestellten Werte mit befriedigender Genauigkeit wiedergegeben werden. Die Funktionen $f_2(T)$ und $g_2(H)$ sind auf Bild 13 dargestellt.

Der neueste Stand der makroskopischen Beschreibung des Feuchtetransportes in Baustoffen wird durch die Theorie von Kiebl repräsentiert, die dieser in seiner Dissertation vorstellte [18]. Obwohl Dampf- und Flüssigkeitstransport makroskopisch nicht voneinander zu trennen sind, schlägt Kiebl vor, die Transportanteile für Kapillarleitung und Diffusion methodisch separat darzustellen, um den Dampf- und Flüssigkeitstransport in Abhängigkeit vom Temperatur- und Feuchteeinfluß getrennt erfassen zu können. Die sich daraus ergebenden vier grundsätzlichen Kombinationsmöglichkeiten lassen sich reduzieren, da der temperaturbedingte Flüssigkeitstransport vernachlässigbar klein ist. Somit bleiben nur die folgenden Transportvorgänge:

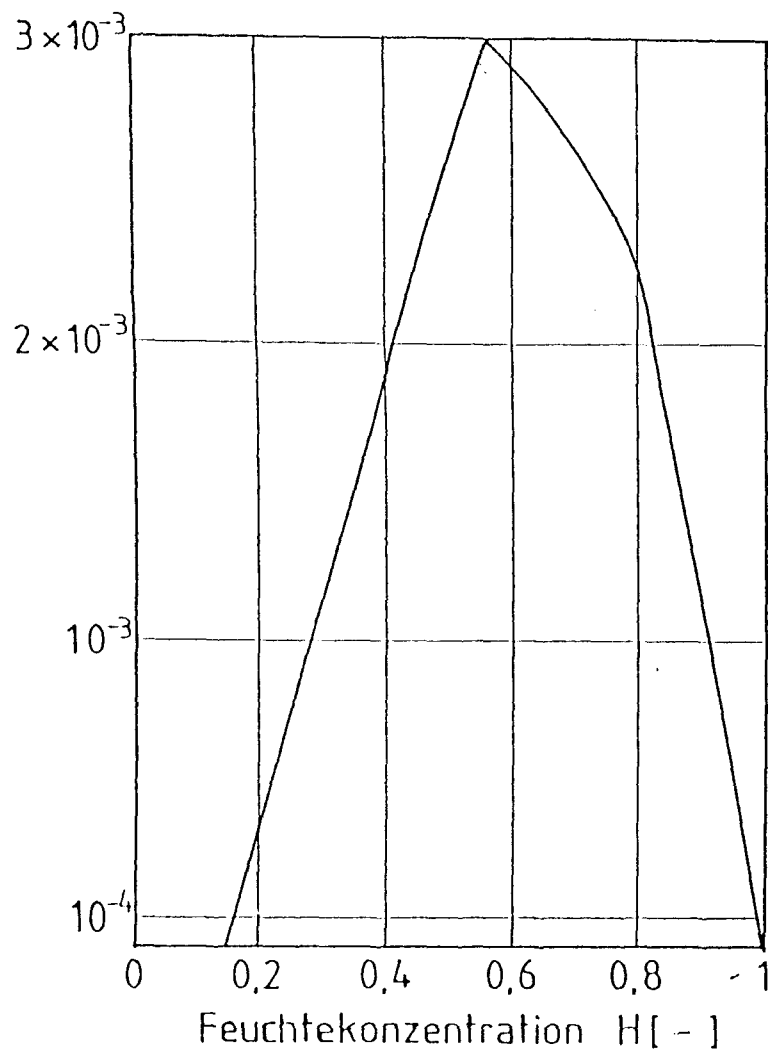
- Flüssigkeitstransport infolge Konzentrationsunterschieden
- Dampftransport infolge Temperaturgradienten
- Dampftransport infolge Temperatureinfluß

Aus diesen Angaben ist ersichtlich, daß die von Kiebl angestellten Überlegungen nur Temperaturen unterhalb 105°C umfassen.

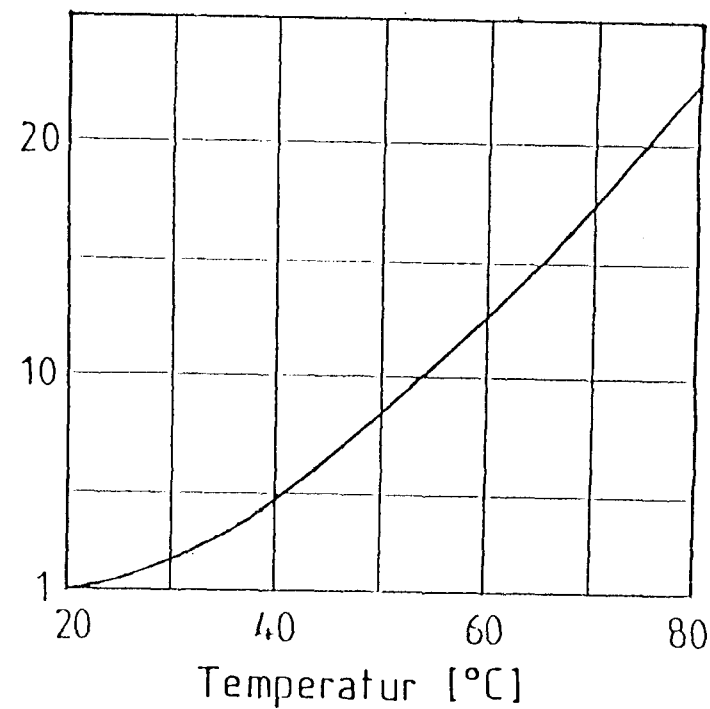
Die einzelnen Teilströme sind mit unterschiedlichen Transportkoeffizienten und Potentialgefällen verbunden, wobei der Feuchtetransportkoeffizient etwa dem hygrischen Transportkoeffizienten k_H entspricht, und die Addition des Einflusses der Dampfdiffusionskoeffizienten aus Feuchte- bzw. Temperatureinfluß annähernd den thermischen Feuchteleitkoeffizienten k_T ergibt. Aus diesem Grunde kann hier auf eine nähere Beschreibung der einzelnen Transportkoeffizienten verzichtet werden. Für die Berechnung werden die Glchn. (9), (10), (12) und (13) empfohlen.

Thermischer Feuchteleitkoeffizient k_T [$\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{Tag} \cdot \text{K}$]

Thermische Feuchteleitfähigkeit $g_2(H)$



Temperaturfaktor $f_2(T)$ [-]



5.2 Einfluß eines erhöhten Temperaturniveaus auf den Wassergehalt von Betonbauteilen

In einem porösen Betonkörper ist bei unterschiedlichem Feuchtegehalt der Umgebungsluft der Gehalt an Porenwasser großen Schwankungen unterworfen. Je größer die relative Luftfeuchte ist, um so höher ist auch der Gehalt des Betons an Wasser. Die sog. Sorptionsisotherme für den Beton gibt nun an, wie groß die in den Porenraum aufnehmbare Wassermenge in Abhängigkeit von der relativen Feuchte φ der umgebenden Luft ist. Der Wassergehalt des Betons, der sich bei einer Temperatur von 20°C im Gleichgewichtszustand befindet, stellt sich als Funktion des Wasserdampfdruckes wie auf Bild 14 angegeben dar.

Mit steigender Temperatur verringert sich die Wassermenge, die bei einer bestimmten relativen Luftfeuchtigkeit im Porenraum gespeichert werden kann. Zur Formulierung dieser Temperaturabhängigkeit der Sorptionsisotherme wurde von Bazant [19] der sog. "hygrothermische Koeffizient $\kappa_{(\varphi)}$ " definiert :

$$\kappa_{(\varphi)} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial T} \right)_u = \text{const} \quad (14)$$

$\kappa_{(\varphi)}$ beschreibt die Änderung der rel. Feuchte bei einer Temperaturänderung um 1 K bei konstantem Wassergehalt u . Mit seiner Hilfe lassen sich die Sorptionsisothermen für höhere Temperaturen im Vergleich zu der Bezugstemperatur 20°C wie folgt beschreiben :

$$\varphi_T = \varphi_{T_0} + \kappa_{(\varphi)} dT \quad (15)$$

Bazant formuliert den hygrothermischen Koeffizienten κ in Abhängigkeit von der Betonfeuchte H , die ja über die Sorptionsisotherme mit dem Luftfeuchtegehalt verknüpft ist, mittels eines empirischen Ansatzes (Bild 15):

$$\kappa_{(H)} = 0,0135 \cdot H \cdot \frac{1-H}{1,25-H} \quad (16)$$

Hierbei wird vorausgesetzt, daß sowohl für völlig trockenen als auch für vollständig wassergesättigten Beton die Gleichgewichtsfeuchte temperaturunabhängig ist. Diese Annahme ist allerdings nur eine grobe Näherung, da bei Temperaturen zwischen 40 und 100°C das verdampfbare Gel- und Kapillarwasser nach [21] parabelförmig mit steigender Temperatur abnimmt, während das nicht verdampfbare sogenannte Hydratwasser temperaturunabhängig ist. Wie aus den Sorptionsisothermen auf Bild 14 zu erkennen ist, nimmt der Gehalt an verdampfbarem Wasser bei erhöhter Temperatur auch bei vollständig wassergesättigtem Beton stark ab.

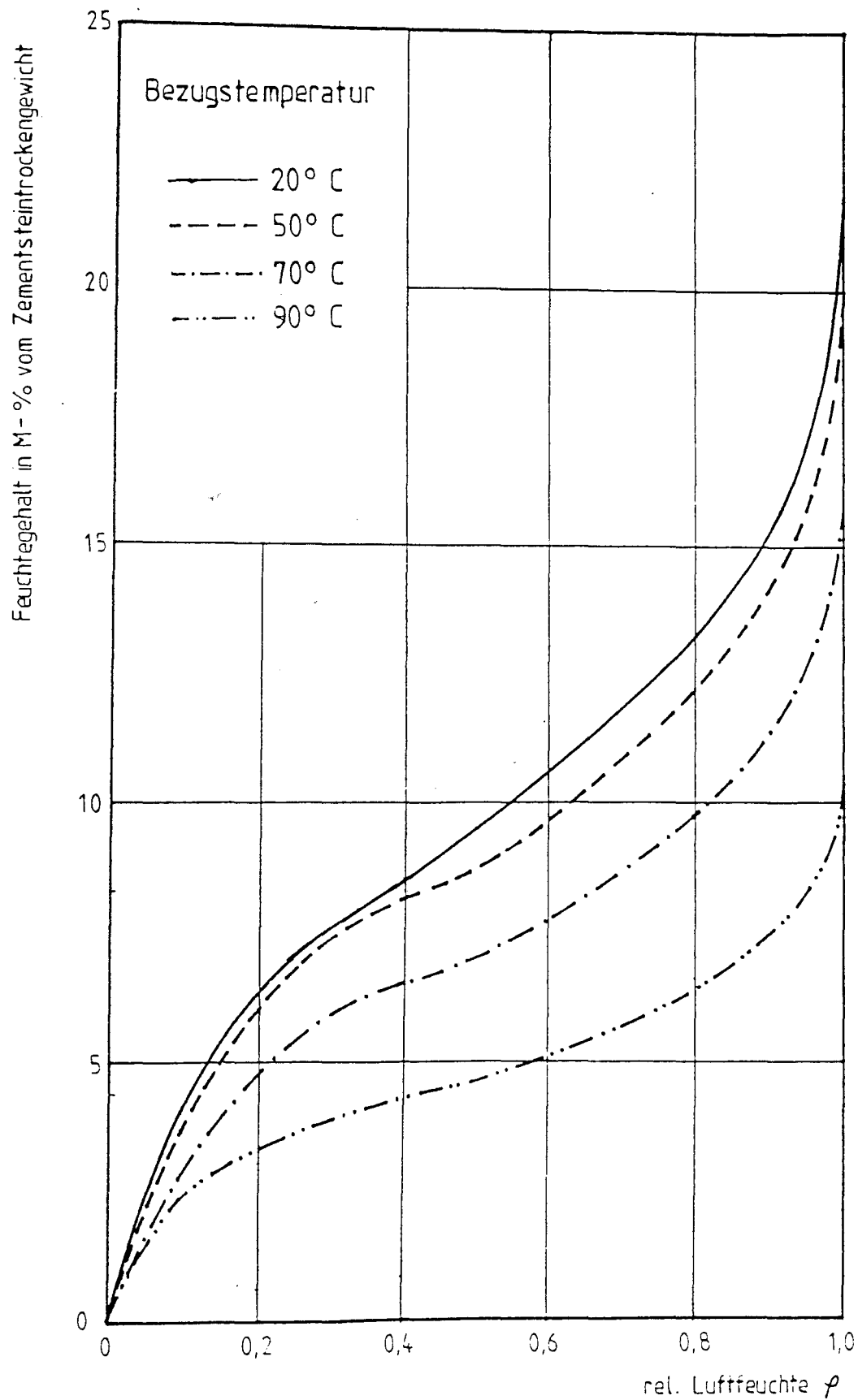


Bild 14 : Sorptionsisothermen bei 20, 50, 70 und 90°C nach /21/

Unter Berücksichtigung der Sorptionsisothermen, die nach [21] berechnet wurden, wird deshalb die Verwendung des folgenden Rechenansatzes zur Bestimmung von x_H empfohlen :

$$x_H = 0,01 \cdot H \cdot \frac{1,15 - H}{1,3 - H} \quad (17)$$

Die Gl. (17) wurde im Rahmen dieser Arbeit empirisch ermittelt und berücksichtigt im Gegensatz zu Gl. (16) die Abnahme des Wassergehaltes infolge Einwirkung erhöhter Temperaturen auch bei vollständig wassergesättigtem Beton. Mit Hilfe dieses Ansatzes ist eine bessere Übereinstimmung mit den Sorptionsisothermen nach Bild 14 zu erzielen als mit der von Bazant entwickelten Gl. (16)

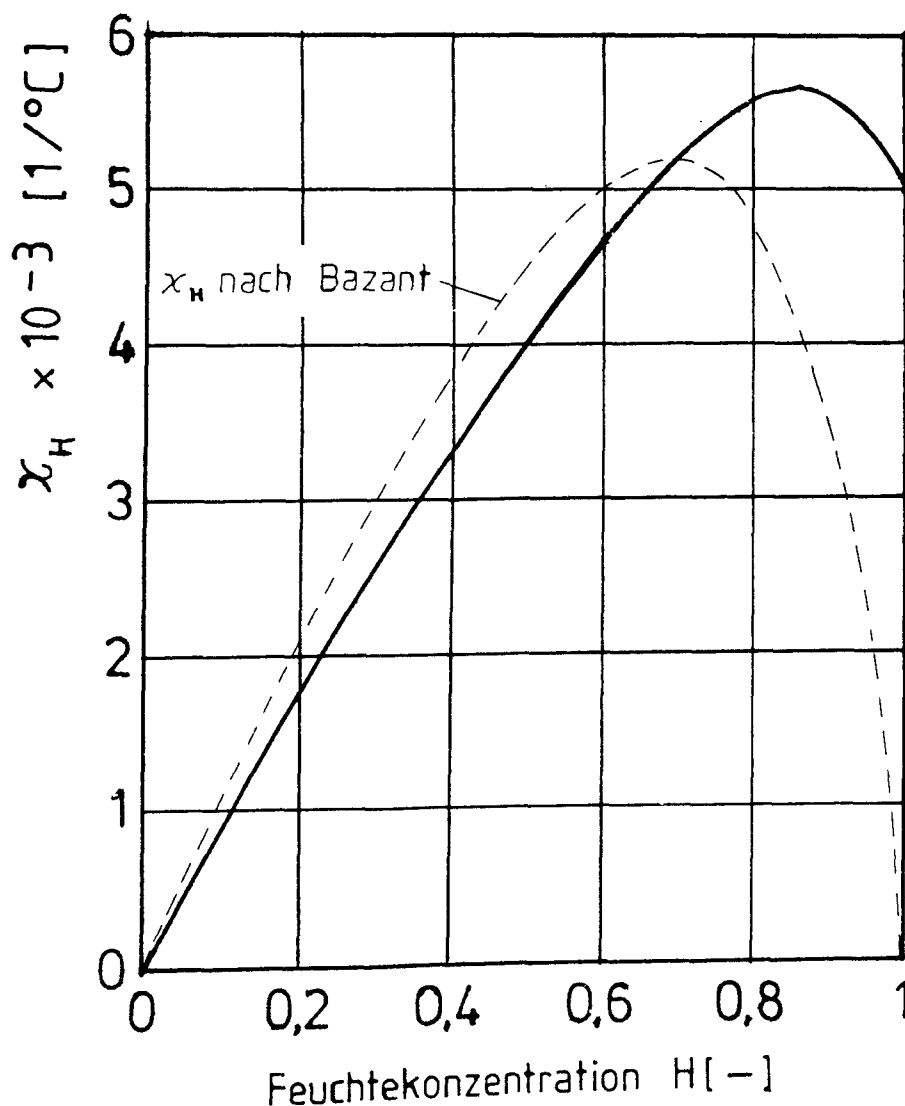


Bild 15: Hygrothermischer Koeffizient x_H

Die Sorptionsisothermen bei verschiedenen Temperaturen werden durch den hygrometrischen Koeffizienten klar festgelegt, wobei die differentielle Beziehung (14) angibt, um wieviel Prozent die relative Luftfeuchte φ größer sein muß, um bei einer höheren Temperatur als der Referenztemperatur 20°C den gleichen Wassergehalt im Beton zu erzielen. Mit Hilfe des empirischen Ansatzes (15) ist die Bestimmung des Wassergehaltes eines Betonkörpers bei einem höheren Temperaturniveau ohne weiteres möglich :

$$H(T) = H(T_0) - \kappa(H) dT \quad (18)$$

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß alle hier dargelegten Modellvorstellungen nur im Temperaturbereich bis zu 105°C Gültigkeit besitzen, da sich ja per Definition alle Aussagen nur auf das verdampfbare, also chemisch nicht gebundene Wasser im Beton beziehen. Oberhalb dieser Grenztemperatur ist der Beton als völlig trocken anzusehen ($H = 0$!).

5.3 Feuchteübergang an der Betonoberfläche

Die Feuchtemenge, die an die Umgebungsluft abgegeben wird, hängt zunächst von der Umgebungsfeuchte ab. Je geringer die relative Luftfeuchtigkeit ist, um so größer wird der Feuchteübergangskoeffizient, d.h. bei völlig trockener Luft (Luftfeuchte $\varphi = 0$) ist die abgegebene Feuchtemenge durch Verdunstung am größten, bei 100% r.F. ist die Feuchteabgabemöglichkeit annähernd Null. Der Feuchteübergang vom Beton zur Umgebungsluft wird weiterhin von der Oberflächenkonzentration der Feuchte beeinflusst, jedoch ist dieser Einfluß so gering, daß er gegenüber der Einwirkung unterschiedlicher Luftfeuchten zu vernachlässigen ist. An dieser Stelle wird deshalb darauf verzichtet, den Feuchteübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Feuchtekonzentration zu definieren, da dieser Wert nicht relevant ist. Zudem ist es üblich, Übergangskoeffizienten in Abhängigkeit vom Zustand des aufnehmenden Mediums anzugeben (Beispiel : Wärmeübergangskoeffizient bei wechselnden Temperaturen) und nicht von der Oberflächentemperatur des betrachteten Bauteils.

Nach [9] ergibt sich der Maximalwert des Feuchteübergangskoeffizienten zu $1,2 \cdot 10^5$ [$\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{Tag}$] bei sommerlichen Witterungsbedingungen mit einer Außentemperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchte von ca. 5%, da normalerweise Luftfeuchtegehalte unter 5% praktisch nie auftreten. Die Darstellung des Feuchteübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte zeigt das Bild 16.

Bei Verdunstungsvorgängen an Wandoberflächen gilt folgender funktionaler Zusammenhang zwischen den Übergangskoeffizienten für Stofftransport (β) und für Wärmetransport (α) :

$$\beta \approx 3,5 \cdot \alpha \quad (19)$$

α wird hier in [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] angegeben, β ergibt sich in [m/h].

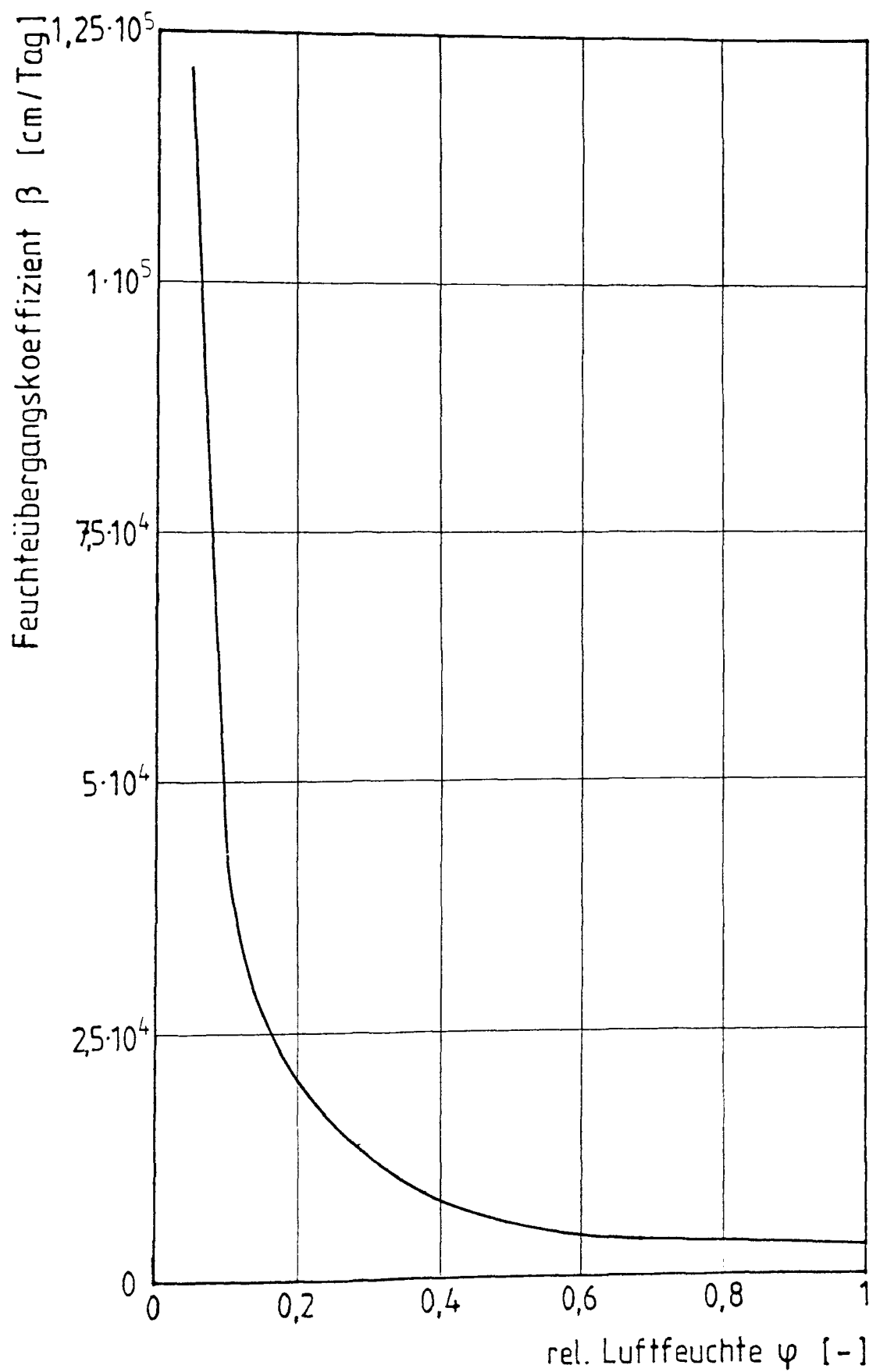


Bild 16 : Feuchteübergangskoeffizient β

Hieraus ergibt sich, daß bei einer Annahme für den Wärmeübergangskoeffizienten α automatisch auch der Stoffübergangskoeffizient β festgelegt wird, wobei β angibt, wieviel m^3 Wasser bei einer Oberfläche von 1 m^2 pro Stunde an die Umgebungsluft abgegeben werden.

Die Ursache für die Existenz dieses einfachen Zusammenhanges ist darin begründet, daß der Wärmeübergang und der Stoffübergang in weitgehend gleichartiger Weise von der Grenzschicht, insbesondere deren Dicke, behindert werden [24].

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die physikalischen Eigenschaften eines Normalbetons mit Basaltzuschlag, der für den Spannbetonbehälter von Hochtemperaturreaktoren entwickelt wurde (HTR - Beton). Ausgehend von den vorliegenden Erfahrungen über das allgemeine Temperaturverhalten von Normalbetonen sind anhand von spezifischen Meßwerten an HTR - Beton und durch Extrapolation von Daten, die an vergleichbaren Betonen gewonnen wurden, Rechenfunktionen entwickelt worden, die die physikalischen Eigenschaften wie Wärmeleitung, Wärmekapazität, Dichte, thermische Dehnung, Feuchteleitung und Feuchtespeicherung bis zum Schmelzen des Basaltbetons beschreiben.

Die Funktionen sind so angesetzt, daß sie keine Sicherheitszuschläge bzw. -abschläge enthalten, sondern im Bereich der nach unserem Kenntnisstand in der Praxis zu erwartenden Materialkennwerte liegen. Sie sind demzufolge für die vorgesehene Sensitivitätsstudie gut geeignet und können darüber hinaus speziell auch für die Weiterentwicklung von temperaturbeständigen Normalbetonen für den HTR angesehen werden. Dazu sind zunächst jedoch die Ergebnisse der theoretischen Studie abzuwarten, weil sich daraus erst die notwendigen Anhaltswerte über solche Kennwerte gewinnen lassen, die das Verhalten des Spannbetonbehälters maßgebend beeinflussen.

7. Literaturverzeichnis :

- [1] **Schneider, U. ; Diederichs, U. ; Rosenberger, W. :**
Basalt-Beton. Eigenschaften und Verwendung
Basalt-Union GmbH, Bonn (1981)
- [2] **Schneider, U. :**
Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen
DAfStb Heft 337, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1982)
- [3] **Eibl, J. et al :**
Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im Reaktordruckbehälterbau
DAfStb Heft 237, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1974)
- [4] **Schneider, U. :**
Concrete at high temperatures — a general review
Fire Safety Journal 13 (1988), S. 55 — 68
- [5] **Arbeitsbericht 1981 — 1983 des SFB 148 "Brandverhalten von Bauteilen"**
TU Baunschweig 1983
- [6] **Schneider, U. ; Diederichs, U. :**
Physikalische Eigenschaften von Beton von 20°C bis zum Schmelzen
Betonwerk + Fertigteil - Technik 47 (1981), Heft 3, S. 141 — 149 und
Heft 4, S. 223 — 230
- [7] **Hundt, J. ; Wagner, A. :**
Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes und des Reifegrades auf die Wärmeleitfähigkeit
von Beton
DAfStb Heft 297, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1978)
- [8] **Werner, H. ; Gertis, K. :**
Energetische Kopplung von Feuchte- und Wärmeübertragung an Außenflächen
DAfStb Heft 258, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1976)
- [9] **Kiehl, K. ; Gertis, K. :**
Nichtisothermer Feuchtetransport in dickwandigen Betonteilen von Reaktordruck-
behältern
DAfStb Heft 280, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1977)
- [10] **Hundt, J. :**
Zur Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton
DAfStb Heft 280, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1977)

- [11] **Hundt, J. :**
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperatur-
gefälles
DAfStb Heft 256, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1975)
- [12] **Wittmann, F. :**
Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins
DAfStb Heft 232, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1974)
- [13] **Weigler, H. ; Fischer, R. ; Dettling, H. :**
Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen
DAfStb Heft 164, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1964)
- [14] **Argyris, J.H. ; Warnke, E.P. ; Willam, K.J. :**
Berechnungen von Temperatur und Feuchtefeldern in Massivbauten nach der
Methode der Finiten Elemente
DAfStb Heft 278, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1977)
- [15] **Argyris, J.H. et al :**
Finite Elementberechnung von Spannbeton – Reaktordruckbehältern
DAfStb Heft 279, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1977)
- [16] **Zerna, W. ; Schnellenbach, G. :**
Werkstoffannahmen zum Kriechen und Schwinden des Betons in Spannbeton –
Reaktordruckbehältern
Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum (1971)
- [17] **Studie zum Verhalten von Spannbeton - Reaktordruckbehältern unter
hypothetischen Störfallbelastungen**
Gefördert vom BMFT unter dem Kennzeichen RS 447
- [18] **Kießl, K. :** Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen
Bauteilen – Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung
Dissertation GH Essen (1983)
- [19] **Bazant, Z.P. ; Najjar, L.J. :**
Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete
Matériaux et Constructions, Vol. 5 (1975), Nr. 25, S 3 - 20
- [20] **Pihlajavaara, S.E. ; Tiusanen, K. :**
A preliminary study on thermal moisture transfer in concrete
State Institute for Techn. Research Finland, Nr. 5 (1970)

- [21] Budelmann, H. :**
 Zum Einfluß erhöhter temperatur auf Festigkeit und Verformung von Beton
 mit unterschiedlichen Feuchtegehalten
 Dissertation TU Braunschweig, Institut für Baustoffe , Massivbau und
 Brandschutz der TU Braunschweig, Heft 76 (1987)
- [22]** Gutachtliche Stellungnahme Nr I 75 5560 - Schn/schr - :
 Vorab - Stellungnahme über die Wärmeleitfähigkeit des "Konstruktionsbetons
 2.3" des Kernkraftwerkes SNR - Kalkar,
 TU Braunschweig (1975)
- [23]** Gutachtliche Stellungnahme Nr I 76 5880 - Schn/Schr - :
 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des "Konstruktionsbetons 2.3" des
 Kernkraftwerkes SNR - Kalkar
 TU Braunschweig (1976)
- [24] Lutz, P. ; Jenisch, R. ; Klopfer, H. ; Freymuth, H. ; Krampf, L. :**
 Lehrbuch der Bauphysik
 Verlag B.G. Teubner, Stuttgart (1985)
- [25]** Materialdaten "HTR - Sensitivitätsstudie" : Thermische Dehnung von
 HTR - Beton
 Persönliche Mitteilung aus dem Institut für Massivbau, Baustoffkunde und
 Brandschutz der TU Braunschweig (1988)
- [26] Schneider, U.:**
 Properties of materials at high temperatures - concrete
 Gesamthochschule Kassel, Juni 1986

8. Anhang, Rechenfunktionen der physikalischen und hygrischen Betoneigenschaften

8.1 Physikalische Kennwerte in Abhängigkeit von der Temperatur T

8.1.1 Spez. Wärmekapazität [kJ/kg·K]

Temperaturbereich °C	Funktionen [kJ/kg·K]
20 – 500	$c_p = 8,96 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,9$
500 – 1200	$c_p = 0,35 \cdot \ln T - 0,83$
> 1200	$c_p = 1,6$

8.1.2 Wärmeleitfähigkeit [W/m · K]

Temperaturbereich [°C]	Funktionen [W/m · K]		
	trocken	feucht	bei 105°C getrocknet
20 – 60	$\lambda = 2,09$	$\lambda = 5,75 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,625$	$\lambda = 1,39$
60 – 100	$\lambda = 2,09$	$\lambda = 1,97$	$\lambda = 1,39$
100 – 250	$\lambda = 2,7 - 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$\lambda = 2,51 - 5,4 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$\lambda = 1,54 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot T$
> 250	$\lambda = 1,16$	$\lambda = 1,16$	$\lambda = 1,16$

8.1.3 Wärmedehnzahl [K⁻¹]

Temperaturbereich °C	Funktionen · 10 ⁻⁶ [K ⁻¹]
20 – 80	$\alpha_T = 1,1875 \cdot 10^{-7} \cdot T + 1 \cdot 10^{-6}$
80 – 180	$\alpha_T = -4 \cdot 10^{-6} \cdot \ln T + 2,8 \cdot 10^{-5}$
180 – 500	$\alpha_T = 6,22 \cdot 10^{-9} \cdot T + 6,21 \cdot 10^{-6}$
500 – 610	$\alpha_T = 1,14 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(4,2 \cdot 10^{-3} \cdot T)$
> 610	$\alpha_T = 2 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,125$

8.1.4 Dichte [kg/m³]

Temperaturbereich °C	Funktionen [kg/m ³]
20 – 1120	$\rho = -49,4 \cdot \ln T + 2648$
1120 – 1180	$\rho = 1,25 \cdot T + 900$
> 1180	$\rho = -3,6 \cdot 10^{-2} \cdot T + 2418$

8.2 Hygrische Kennwerte in Abhängigkeit von der Betonfeuchte H

8.2.1 Feuchteleitfähigkeit k_H nach Pihlajaara $[\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{Tag}]$

$$k_H = 0,35 \cdot \left(0,05 + \frac{0,95}{1 + (4 - 4 \cdot H)^3} \right)$$

8.2.2 Hygrische Feuchteleitfähigkeit k_H nach Bazant $[\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{Tag}]$

$$\text{Feuchteleitkoeffizient } g_1(H) = 0,25 \cdot \left(0,05 + \frac{0,95}{1 + (4 - 4 \cdot H)^{16}} \right) \quad [\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{Tag}]$$

$$\text{Temperaturfaktor } f_1(T) = \frac{T}{T_0} \cdot \exp \left[4683 \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad [-]$$

$$\text{Hygrische Feuchteleitfähigkeit } k_H = g_1(H) \cdot f_1(T)$$

8.2.3 Thermale Feuchteleitfähigkeit s_H nach Pihlajaara $[\text{cm}^3/\text{cm}^3 \cdot \text{K}]$

$$s_H = 0,2 \cdot H \cdot \left(\frac{1,1 - H}{1,7 - H} \right)$$

8.2.4 Thermische Feuchteleitfähigkeit k_T nach Kiehl $[\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{Tag}\cdot\text{K}]$

Feuchtebereich %	Funktionen $[\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{Tag}\cdot\text{K}]$
0 – 56	$f_2(H) = 5,36 \cdot H + 2,4 \cdot 10^{-7}$
56 – 80	$f_2(H) = 3,91 \cdot 10^{-2} \cdot H^3 - 6,58 \cdot 10^{-2} \cdot H^2$ $+ 3,16 \cdot 10^{-2} \cdot H - 9,26 \cdot 10^{-4}$
80 – 100	$f_2(H) = -1,128 \cdot 10^{-2} \cdot H + 1,1304 \cdot 10^{-2}$

Achtung : Die Betonfeuchte ist bei der Bestimmung von $f_2(H)$ in % anzugeben !

$$\text{Temperaturfaktor } g_2(T) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^6 \cdot \exp \left[\frac{5,34 \cdot 10^{13}}{T^4} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad [-]$$

$$\text{Thermische Feuchteleitfähigkeit } k_T = f_2(H) \cdot g_2(T)$$

8.2.5 Hygrothermischer Koeffizient χ_H $[1/^\circ\text{C}]$

$$\chi_H = 0,01 \cdot H \cdot \frac{1,15 - H}{1,3 - H}$$